Un cero inalcanzable
Breve historia del Calor y la Temperatura.

Preguntas a modo de prólogo

Las sensaciones de calor o frío, son claras, íntimamente evidentes. No hay que explicarle a nadie el calor y el frío. Lo sentimos desde que somos niños, y lo experimentamos todos los días de nuestra vida. Seguro que de chicos nos tomaron la fiebre con un termómetro. "Tenés temperatura", nos habrán dicho, y uno estaba caliente, tenía mucho calor o al contrario sentía de golpe mucho frío.

Pero es difícil de explicar en palabras que SON de verdad el calor y la temperatura. Si tuviéramos que contarle a un marciano que nunca sintió frío ni calor, ¿como le explicamos esas cosas tan familiares que nos acompañan en cada momento de la vida? ¿Calor y Temperatura son lo mismo? ¿Son dos cosas parecidas pero no iguales?

Los científicos se plantearon también estas preguntas (son niños grandes) y las respuestas resultaron útiles. Por el camino se generaron nuevas ideas, como la de Energía. Todos estos estudios y los conceptos descubiertos al responder la pregunta, se usan hoy para construir nuestros motores, para calentar mas eficientemente nuestras casas y para enfriar alimentos que de otra forma se pudrirían rápidamente. O sea que a partir de una pregunta infantil se puede llegara a cosas de alto interés práctico. Por algo se invierte dinero en investigación científica.

También se puede usar algo sin entender para nada lo que se hace, y desde muy temprano el hombre ha usado el fuego para calentarse, la primera fuente artificial de calor y la más importante tecnología descubierta. Es tan antigua que su origen se pierde en la prehistoria, y tan actual que sin el fuego nuestras máquinas se detendrían y nuestra civilización también. Pero hay un largo camino desde la hoguera de un cazador paleolítico a la llama de la turbina de gas que produce nuestra electricidad. Hizo falta desarrollar ideas, además de métodos prácticos, para entender lo que era el fuego, el calor y la temperatura.

Este libro intenta explicar cómo fueron cambiando las ideas de los hombres sobre el fuego, el calor y la temperatura. La Termodinámica es la rama de la ciencia que explica estas cosas hoy en día, pero no ha sido siempre así. Hubo en la historia otras teorías o ideas sobre este fenómeno que llamamos calor.

Los termómetros no existieron siempre. Las heladeras, tampoco. Enfriar no es fácil. Y no se puede enfriar infinitamente. Hay un límite, una temperatura mínima, que además es inalcanzable. En el resto del libro contaremos la historia de las ideas sobre el calor y el frío y la lucha de los hombres por llegar a temperaturas cada vez más bajas. Esta empresa de enfriar, a veces tomó la forma de una carrera, con competidores de diferentes países. La carrera sigue, aunque no hay comité olímpico ni encuentros cada cuatro años. Se corre en laboratorios de física de diferentes lugares del mundo, y los récords se miden en micro grados. En esta carrera ya se han descubierto fenómenos que parecen de otro mundo, donde las reglas son diferentes que en la vida de todos los días.

Pero comencemos con la historia.

Griegos, elementos, átomos.

Como casi todas las historias de la ciencia, arrancamos con los antiguos Griegos. Es que los griegos, con esa creatividad infinita que los caracterizó, sentaron las bases de nuestra ciencia actual. Pero no hay que caer en el error de pensar que la ciencia griega era igual a la de nuestros días. Los griegos inventaron la filosofía, una manera de ver el mundo, que de alguna forma es el tatarabuelo de la manera científica actual de interpretar los fenómenos de la Naturaleza.

La filosofía griega, es verdad, tiene dos características que heredó la ciencia moderna. En primer lugar, la filosofía griega se expresa en palabras. Estamos tan acostumbrados a esta idea que nunca la cuestionamos, sin embargo no todo el mundo piensa así, ni todo el conocimiento es verbal. Por ejemplo, la sabiduría oriental admite que gran parte del conocimiento NO puede expresarse en palabras, y por eso se recurre a metáforas, imágenes poéticas y circunloquios para indicar un camino no verbal que un discípulo tiene que seguir por su cuenta, en su fuero interno, guiado por un maestro vivo.

También hay conocimiento no verbal de carácter más o menos trivial o cotidiano. A nadie se le ocurre aprender a andar en bicicleta o nadar leyendo un manual de instrucciones. Como en la sabiduría oriental, un maestro puede indicarnos movimientos que nos ayuden a nadar, pero la práctica la tenemos que hacer por nuestra cuenta y con nuestro propio cuerpo. Para andar en bicicleta nos largamos solos y el cuerpo aprende.

Los griegos eran un pueblo hablador, verborrágico y discutidor. La retórica era fundamental en su vida política, y por eso ponían gran énfasis en la palabra. Con la escritura las palabras de los sabios se podían guardar tal cual y gracias a eso todavía podemos (si queremos) leer a Platón o a los filósofos griegos. Ellos han hecho el mayor esfuerzo para que sus palabras reflejen claramente su pensamiento, las tenemos que interpretar en su sentido literal. Si se usan las metáforas es como método auxiliar, para ilustrar alguna idea.

La ciencia ha adoptado este punto de vista. Los trabajos científicos se escriben de la manera más clara y racional posible. Se da gran importancia a publicar y difundir el saber por la palabra, muy a menudo suplementada por fórmulas matemáticas que al fin y al cabo son otra forma de lenguaje. La claridad es una de las virtudes más deseables en un escrito científico aunque no siempre se consigue en la práctica. Lo mismo pasa con la racionalidad, el otro ingrediente fundamental que la ciencia moderna adoptó de los griegos.

Los griegos creían que el mundo puede ser comprendido por nuestro intelecto, y esta es la definición de racionalidad a la que me refiero, aunque la palabra racional pueda tener otra infinidad de sentidos o definiciones. Hoy nos parece natural también, que el mundo sea algo que nos podemos esforzar en entender de forma lógica y coherente. Pero no siempre ha sido así y la mayoría de los mitos de pueblos anteriores a los griegos explican las cosas en base a revelaciones divinas, a conjuntos de ideas no conectadas entre sí o contradictorias, caprichos de dioses o fuerzas de la naturaleza arbitrarias.

Un dogma central de la ciencia es que el mundo puede ser entendido racionalmente, por lo menos el mundo de la Naturaleza, medible y accesible a nuestros sentidos y aparatos de medición. Lo sobrenatural está fuera de la discusión científica.

Sin embargo, los griegos no hacían ciencia en el sentido moderno del término, hacían filosofía. Platón, uno de los pilares de esta filosofía desconfiaba de los sentidos, y afirmaba que la sola razón era la guía más sólida para llegar a la verdad. La medición empírica no era importante para él. En verdad le importaba mucho menos conocer la Naturaleza que los problemas humanos como la Moral o la Filosofía de la Política. Un concepto central en Platón es la existencia de un mundo de las Ideas, más perfecto y más permanente que el real. Por ejemplo hay mil modelos de sillas, con distintas formas y tamaños, pero la *Idea* de silla las abarca a todas, es una silla perfecta, que no se destruye ni corrompe y tiene por lo tanto una identidad más profunda que las realizaciones concretas, perecederas e imperfectas de las sillas materiales. Otro ejemplo menos

pedestre sería la Idea de Belleza. Vemos objetos, estatuas y cuadros bellos pero estos son sólo corporizaciones de una *Belleza* ideal, que cada artista se esfuerza en alcanzar.

La ciencia viene marcada por esta idea Platónica de lo *ideal*. Los conceptos científicos que usamos son en gran medida, idealizaciones. Los *conceptos* fundamentales deben ser independientes de las construcciones físicas o experimentales que permiten medirlas o definirlas. Sin embargo, como contrapeso, se pide que los entes ideales usados sean *observables* y que haya una forma empírica aunque sea indirecta de medir u observar lo que formulamos como concepto científico.

El calor o la temperatura son ejemplos de estos conceptos ideales, pero los griegos no tenían termómetros ni calorímetros para cuantificarlos y medirlos.

Tampoco había una definición del concepto de temperatura o calor en el sentido moderno, que apareció mas de mil años más tarde. Sin embargo hay algunos otros entes ideales que se remontan a los Griegos y que entran en nuestra historia como protagonistas. Aunque han evolucionado mucho a lo largo del tiempo se puede reconocer su origen en escuelas filosóficas griegas.

La idea de *elemento* la propagó Aristóteles, uno de los filósofos griegos más interesados en la descripción de la Naturaleza y cuyas ideas tuvieron una influencia enorme. Había conocido el ideal Platónico de su maestro, que fue Platón en persona. Sin embargo, Aristóteles se interesaba por observar el mundo natural y tratar de explicarlo. Para ello le sedujo la idea de otro filósofo griego, llamado Empédocles que decía que había solo *cuatro elementos* que al combinarse, constituyen todos las sustancias materiales que conocemos en sus diferentes formas. Los elementos son la tierra, el agua, el aire y el fuego. Todavía la gente recuerda esta idea Griega, hasta hubo películas con títulos alusivos a ella.

Los cuatro elementos no fueron elegidos en forma arbitraria, recordemos que la racionalidad era esencial en la filosofía griega. Aristóteles *razonaba* para establecer la lista, basado en principios que a él le parecieron fundamentales y su argumentación era así: “Es imposible que la misma cosa sea a la vez húmeda y seca, caliente y fría. El fuego es caliente y seco el aire es caliente y húmedo, el agua es fría y húmeda y la tierra es caliente y seca, por representar estas cualidades en forma pura es que estos cuatro elementos son fundamentales.” De esta manera los elementos se caracterizan por tener cualidades extremas de calor y humedad y todo lo demás tiene cantidades intermedias de estas cualidades. Que el fuego sea caliente y seco parece obvio, menos claro es que el aire sea caliente y húmedo, sobre todo en invierno, pero así se explicaban los elementos.

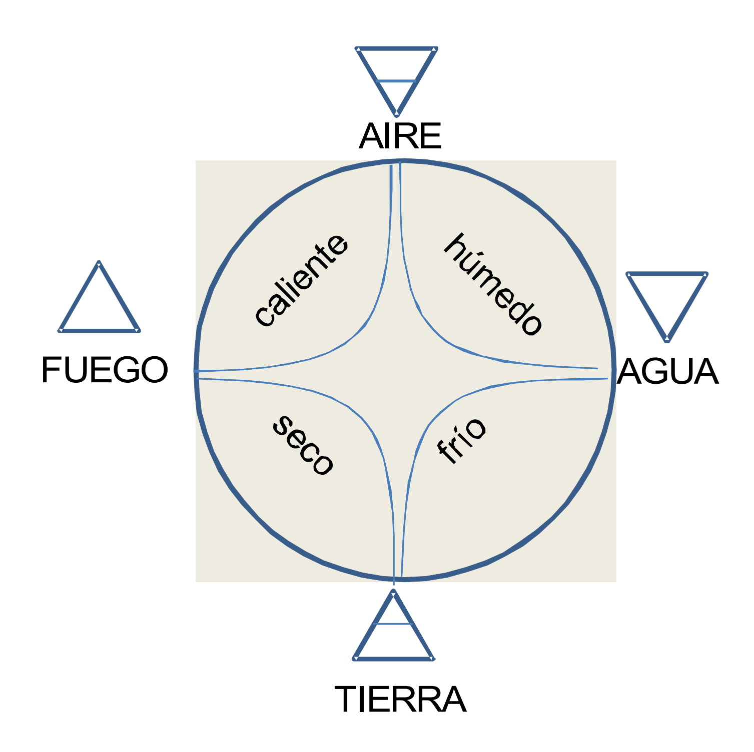


Figura 1
Esquema de cómo se presentaban a veces los elementos de Aristóteles y las cualidades asociadas. Los símbolos triangulares representaban a los elementos. El fuego tendía a las alturas, a su lugar de reposo en las esferas celestes, la tierra a caer, a su lugar de reposo en el centro de la tierra. Las otras substancias eran intermedias entre los cuatro elementos, con cualidades variables.

Como con muchos razonamientos errados, la trampa está en los postulados o premisas de arranque. Como reza una vieja máxima de los programadores: si se introduce basura, se obtiene basura. El programa puede andar bien, pero los datos de entrada también deben ser buenos. Por eso el lógico silogismo de Aristóteles fue abandonado por la ciencia actual, que parte de otras premisas, basadas ahora en experimentos u observaciones. Nunca vamos a estar a salvo de que otras épocas encuentren nuestras postulados equivocados, aunque para ser científicos, los nuevos postulados deberán explicar o ajustarse a lo que se observe en la naturaleza.

No hubo ningún intento de Aristóteles por cuantificar calor o humedad, los consideraba cualidades y punto. El calor y la temperatura fueron cuantificados mucho después, casi dos mil años después. Y el fuego perdió su papel como elemento, pero pasó a ser considerado una forma de energía. También el aire dejó de ser un elemento, pero jugó un papel fundamental en la ciencia del calor, y la tecnología del frío. Las heladeras deben mucho a los estudios que se hicieron sobre el *comportamiento* de los gases y el aire, una vez que se supo que hay muchas substancias gaseosas diferentes, lo cual no es para nada evidente y menos con la tecnología disponible en tiempos de Aristóteles.

Otras escuelas de filósofos griegos tenían ideas diferentes. Demócrito y sus seguidores, por ejemplo, pusieron el énfasis en el movimiento y especularon sobre la posibilidad de división de la materia. Es fácil de observar que un objeto de la vida cotidiana, pan, pedazo de piedra, gota de agua, se puede partir por la mitad y tenemos dos gotas de agua, dos panes o dos piedras menores. Podemos repetir este procedimiento, y quedarnos con pedazos cada vez más chicos, esto es obvio. ¿Y que pasa si repetimos hasta el infinito? ¿Se puede seguir ? Muchos nos habremos hecho esta misma pregunta, y contemplado las dos respuestas, sí o no. El criterio para decidirse por una u otra no es muy evidente, al menos si no tenemos más datos que nuestra posibilidad de imaginar las dos situaciones.

Demócrito optó por el *no* o sea por frenar el proceso en algún punto. Por eso pensaba que debe haber componentes indivisibles, donde no se puede continuar el proceso de división. *Thomos*

es la palabra griega que significa *cortar* o *partir* y el prefijo *a* sirve de negación, así que Demócrito bautizó *athomos* (incortables) a sus partículas indivisibles.

Es mucho más difícil, me parece a mí, hacerse una imagen mental de la idea opuesta, o sea de una división hasta el infinito. Sin embargo la división infinita se usa mucho en matemática o geometría, donde “imaginamos” que una recta, un ente abstracto, se puede dividir hasta el infinito. Debo confesar que si bien la idea me parece lógica, me resulta imposible cerrar los ojos y ver en mi cabeza los infinitos puntos en que se divide un recta. Siempre veo puntos separados, como para ser contados y esa no es la idea abstracta, matemática. En algún momento me fallan las imágenes, y tengo que confiar en la lógica, que puede llegar más allá que nuestra imaginación visual.

Por lo demás, las ideas de Aristóteles y Demócrito eran muy diferentes. Aristóteles, por ejemplo, creía que los objetos y sus cuatro elementos buscaban siempre su lugar natural de equilibrio, y por eso los sólidos caían (su lugar natural de equilibrio estaba en el centro de la tierra) y el fuego subía hacia su propio lugar de equilibrio, en los cielos. En cambio para Demócrito, lo esencial era el movimiento, el cambio, y la naturaleza estaba en perpetuo movimiento. Sólo los átomos indivisibles permanecían iguales, y los cambios observados correspondían a perpetuas recombinaciones y disociaciones de los átomos.

Hasta cierto punto, la imagen moderna coincide con Demócrito, y la idea de átomo es fundamental para la ciencia pero ahora tenemos muchos más datos que los que tenía Demócrito. En los siguientes capítulos veremos un poco cómo se fueron refinando las ideas de átomos y elementos, que coexisten sin conflicto en la ciencia actual. Pero los elementos y los átomos actuales no son los mismos que los de Aristóteles y Demócrito. Los objetos ideales de *átomo* y *elemento* han evolucionado mucho. Ahora reconocemos más de cien elementos químicos y lo que llamamos átomo ya no es más indivisible, pero los nombres se han mantenido. De alguna manera los nombres, que al fin y al cabo son algo efímero que no hace a la substancia de las cosas, han resultado más duraderos que el *ideal platónico* original de Aristóteles y Demócrito. Paradojas del pensamiento y la palabra humana.

Entonces, de todas las ideas de la Filosofía Griega, que son muchas, vamos a seguir el desarrollo histórico de los Átomos de Demócrito y de los Elementos de Aristóteles. Estos objetos ideales han ido mutando, hasta nuestros días, y resultaron importantes en el desarrollo de nuestras ideas sobre Calor y Temperatura.

Las Legiones Romanas conquistaron a las ciudades Griegas donde vivieron Demócrito y Aristóteles, pero la Filosofía Griega conquistó a los Romanos. En realidad, desde su fundación como pequeña aldea, la ciudad de Roma vivió en estrecho contacto con las ideas griegas, y copió sus dioses y su arte. Durante el Imperio Romano el pensamiento griego se esparció por toda la actual Europa Occidental, el norte de África y el Cercano Oriente, en los territorios conquistados por Roma.

Pero en nuestra historia, vamos a decir muy poco de este período, ya que a pesar de avances en otros campos, no se modificaron esencialmente los postulados griegos, en particular los referidos al calor, los elementos o los átomos. El Imperio Romano, eso sí, creó un espacio de cultura común, en donde se gestó la Ciencia moderna. Hubo muchos cambios, por supuesto, en los mas de 1600 años trascurridos desde la caída de Roma, pero somos herederos culturales de muchas cosas Romanas, empezando por el idioma en que está escrito este texto. De la misma forma que el Español no es el Latín, las ideas originales de Griegos y Romanos han ido mutando. La Idea misma de Conocimiento, Ciencia o forma de llegar a una Verdad, ha cambiado mucho. Los propios Romanos cambiaron a sus originales dioses Griegos por el Cristianismo, y como el Cristianismo sobrevivió a la caída política de Roma, tuvo influencia en el desarrollo subsiguiente del pensamiento humano en los restos del Imperio.

En el año 476 de nuestra era fue depuesto el último Emperador Romano, Rómulo Augústulo, y comienza lo que se dio en llamar la Edad Media.

La Edad Media tiene mala fama, o mala prensa entre los historiadores. La llaman la Edad Oscura, porque sabemos poco de la primera etapa, desde la caída de Roma al año 1000 aproximadamente. En esta primera etapa hubo en Europa invasiones de todo tipo, de Vikingos, Magiares, Sarracenos, por no hablar de los famosos Hunos y su jefe Atila. Por eso no es de extrañar que la organización social Romana se haya destruido y tengamos pocas crónicas de la época. Tampoco se puede esperar un gran desarrollo científico, aunque ni la Ciencia ni el Arte desaparecieron del todo. Lo que sí ocurrió es que ambas, Ciencia y Arte se volcaron a lo religioso.



Figura 2
Imagen de un alquimista del Renacimiento, con símbolos que solo podían conocer los iniciados.

La Iglesia sobrevivió al Imperio Romano, y fue lo que dio alguna coherencia cultural y organizativa a los descendientes de los ciudadanos romanos, además de convertir a los invasores

bárbaros al Cristianismo. Los Monasterios pasaron a ser lugares donde se preservó el saber en Europa. Otros saberes se fueron desarrollando, por ejemplo, en los constructores de castillos y edificios religiosos. Para el año 1000 se empezaron a construir magníficas catedrales en muchas ciudades Europeas. Muchas ciudades, además, estaban rodeadas de murallas también monumentales, en esta época de guerras continuas. Los constructores, artesanos y artistas de estas obras han permanecido anónimos y es posible que muchos hayan sido analfabetos. Sin embargo generaron conocimiento práctico y aún admiramos hoy las Iglesias y castillos de la Edad Media que han permanecido en pie.

Es decir, que la Edad Oscura, no lo fue tanto, pero es cierto que las obras de filósofos Griegos y Romanos fueron abandonadas y el énfasis del saber se dirigió a la Teología antes que al conocimiento de la Naturaleza.

Esto ocurrió en la fracción Europea del Imperio Romano, sin embargo, en el Cercano Oriente y el Norte de África, la historia fue diferente. A fines de los años 600 de la Era Cristiana apareció el Islam, y los Árabes empezaron una expansión que los llevaría por el norte de África hasta la frontera actual de Francia y España. Unificado en religión, como Europa bajo el Cristianismo, y también unido políticamente, a diferencia de los reinos Cristianos desunidos, los musulmanes crearon un Imperio propio.

Fue un lugar donde se valoraba el saber. La religión era tan importante para los musulmanes como para los cristianos, y por eso existía un importante sesgo religioso, pero fue alentado todo el conocimiento, incluido el de la Naturaleza.

No es este el lugar de hacer una descripción completa de la ciencia desarrollada por los estudiosos islámicos, pero los conocimientos adquiridos fueron importantes. En particular nos interesa lo referido a los elementos y el calor. Vamos a hablar un poquito del desarrollo de estas ideas en la Edad Media, pero conviene recordar la importancia de la ciencia islámica, a pesar de que algunos estudios occidentales no reconocen su verdadero valor, y se tiene la imagen de que los árabes solo recopilaron y mantuvieron la herencia de la ciencia y filosofía griega para los estudiosos europeos del Renacimiento. En el Renacimiento, precisamente, nació la idea del poco valor del conocimiento Medieval en general, y el Islámico en particular. Los hombres del Renacimiento se vieron a si mismos como re-descubridores de la sabiduría y el arte greco romano, y como los sucesivos Imperios musulmanes eran poderosos rivales políticos, era lógico que ningunearan los aportes de sus sabios. Encima eran herejes, y como los cristianos también eran herejes para los musulmanes, no es de extrañar que el ninguneo fuera recíproco. Sin embargo, en la larga historia del período, hubo momentos y lugares donde ambas culturas se encontraron y el intercambio de ideas fue posible.

Una disciplina donde se hizo “ciencia” fructífera en la Edad Media, fue entre los Alquimistas, tanto musulmanes como cristianos. Pongo “ciencia” entre paréntesis, no por denigrar la Alquimia, sino para indicar que el concepto de conocimiento al que respondían los Alquimistas era diferente de lo que consideramos conocimiento científico en la actualidad. Hay mil años de historia en el medio, y no es de extrañar que la mentalidad haya sido otra. Lo extraño, tal vez, es que los Alquimistas hayan obtenido resultados, y usado métodos, que resultaron útiles para los Químicos actuales. Por supuesto, también tenían ideas “equivocadas”, sobre todo a la luz del conocimiento posterior, pero hay que recordar que algunas ideas erróneas son útiles para obtener ideas mejores, y en su momento pueden haber sido la mejor respuesta a las preguntas que se hacen en una época. También hay que recordar que la filosofía del conocimiento cambia, es decir, se modifica hasta el criterio de lo que significa un saber válido, o útil, o relevante, a la vez que cambia el conocimiento mismo.

Los Alquimistas estudiaron los Elementos aunque el significado de “estudiaron” y “elemento” no son los que usamos en Ciencia moderna. Pero como ya dijimos, algunos resultados son válidos, y se usan en la Química actual.

Un alquimista importante es conocido como Geber en occidente, pero su verdadero nombre

era Abu Musa Jabir ibn Hayyān. Vivió entre los años 721 a 815 entre los actuales Iraq e Irán, y que en su época era parte de los territorios pertenecientes al Islam. No era solo un alquimista sino también un médico, filósofo y sabio de renombre. Aparentemente muchos de sus escritos son sumamente oscuros de interpretar, como ocurría con gran parte de la Alquimia, ya que la idea era mantener el secreto, o trasmitir el conocimiento únicamente a discípulos que conocieran el código. Sin embargo, muchos de los aparatos o métodos desarrollados, se podían copiar, y estos han resultado más útiles que los resultados teóricos. Jabir, o Geber, ya conocía la destilación, la cristalización y la forma de sintetizar varios compuestos químicos, y este saber se tradujo luego al Latín y Griego (Jabir escribía en Árabe, aunque su idioma natal era el Persa). Los Alquimistas medievales europeos tenían en gran estima los textos de Geber y usaron sus métodos de purificación y aparatos como los alambiques, en los que se podían destilar muchas substancias.

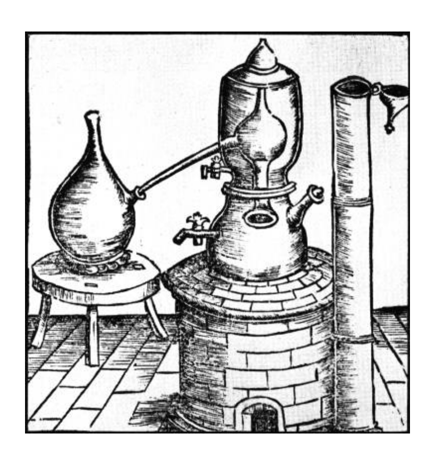


Figura 3
Un alambique primitivo para destilar diferentes líquidos. Estos dibujos de aparatos son claros, y trasmitieron conocimiento útil para que avanzara la química, proporcionando recetas y nuevos compuestos. No se llegó a la Piedra Filosofal, pero la utilidad del aparato no dependía de lo que creían los alquimistas.

Nadie les pagaba sueldo a los Alquimistas. Hoy en día lo normal es que un químico competente gane un sueldo razonable, pero la Edad Media era otra cosa y el sustento de la Alquimia venía por otro lado. De un lado más místico y más ambiciosamente materialista, en proporciones variables.

Algunos buscaban llegar a la sabiduría, a la iluminación, a través del estudio de las propiedades de los constituyentes últimos del Universo, analizándolos y descomponiendolos por las operaciones de la Alquimia. También, más o menos desde Geber, algunos creían que poseyendo este conocimiento Universal, se iba a lograr la “trasmutación” de metales “viles” como el Plomo, en metales “nobles” como la plata y el oro. También que iban a descubrir la Piedra Filosofal, y con ella producir el Elixir de la Vida, que proporcionaría vida eterna al que lo tomara. O sea, ambicionaban vivir para siempre y plata a discreción. No consiguieron tanto, pero al manipular sustancias, produjeron conocimiento útil, si se lo juzga con parámetros más modestos.

Geber parece haber sabido que destilando el vinagre en su aparato producía un concentrado mas potente, hoy lo hubiéramos llamado ácido acético diluido, y algunos piensan que destilando vino, también habría producido alcohol. Decimos “parece” o “se piensa” porque algunos de estos descubrimientos pueden haber sido posteriores y adjudicados a Geber después. Incluso hay un autor que es conocido como “falso Geber” porque sus trabajos están presentados como si fueran obra de Geber aunque hay evidencia de que fueron producidos mucho mas tarde. Tampoco era importante para los Alquimistas la fama individual, vivieron siglos antes del sistema académico actual, donde el prestigio se gana a través del número y calidad de las propias publicaciones.

Tampoco existían las Patentes. Hoy en día, Geber hubiera patentado su sistema de destilación, y habría hecho más plata que transformando plomo en oro. Tanto la nafta como el whisky son productos destilados. Las regalías que hubiera percibido Geber de la industria del petróleo y la de las bebidas alcohólicas hubieran sido monstruosas. Claro que el descubrimiento de la destilación hace siglos que está en el dominio público, y ha sido refinado y perfeccionado por muchos otros. Geber lo utilizó, pero tampoco debe haber sido su inventor, cuyo nombre está perdido en las nieblas de la historia.

La moraleja es que la Edad Media era distinta. Hay que entender que era una época mucho más mística, imbuida de lo sobrenatural y lo misterioso, y donde la organización social era más rudimentaria. Nadie podía financiar un sistema de investigación en Ciencia y Tecnología, aunque la corte del Califa Harun al Rashid, contemporáneo de Geber, era un ámbito de protección al saber y las artes. Los temas filosóficos considerados importantes también eran otros, pero Geber y los Alquimistas parecen haber sido los primeros en defender lo que hoy podríamos llamar la “Ciencia Experimental”. Creían en la utilidad de hacer experimentos, en manipular substancias para descubrir su esencia. Allí se apartaban de Aristóteles y su confianza casi excluyente en la razón como método de descubrir la verdad. Y así dejaron un legado importante de conocimientos, aunque muchos otros han quedado en el olvido o se abandonaron como erróneos a la luz del conocimiento posterior.

Pero volvamos a los Elementos. Los Alquimistas querían la trasmutación, mientras que sabemos hoy en día que esto es imposible, salvo en casos excepcionales y a un costo altísimo. Pero al enfrentar el desafío y manipular substancias se fue descubriendo una variedad de nuevos compuestos y reacciones químicas. Algunos se atrevieron a poner en duda al propio Aristóteles. Y con esta impertinencia ayudaron, o comenzaron, a sentar las bases de un pensamiento que la Ciencia moderna considera clave. Esto es: El conocimiento se basa en la experimentación y la comprobación empírica, NO en la autoridad de ningún científico por genial que sea.

Geber añadió el azufre y el mercurio a los elementos de Aristóteles, y creía también que todos los metales eran combinaciones de azufre y mercurio en proporciones variables. Pero esto fue negado por otro alquimista árabe, Abu Jusuf Al Kindi (801- 873) un poco posterior a Geber, que no creía en la trasmutación. El crédito de destilar alcohol por primera vez es atribuido a Al Kindi por algunos. Era más que un alquimista; también produjo escritos en criptografía, matemáticas y música. En general, estamos resaltando el rol en la Alquimia, pero la mayoría de los estudiosos Medievales, sean Cristianos o Musulmanes, abarcaban muchos campos y debían ganarse la vida combinando actividades de astrónomos, médicos y astrólogos.

Posteriormente Avicenna (Abu Alib al Husayn ibn Sina 980-1037) que fue primordialmente médico, destiló “esencia de rosas” en su alambique, para usarlo en aroma terapia. Con esto podría decirse que fue un precursor de la industria de la perfumería, pero su principal importancia en Occidente fue como proponente del método experimental, y sus escritos fueron traducidos y estudiados por los cristianos. Parece que la Universidad de París prohibió sus obras en 1210, pero eso no impidió que se propagaran. Avicenna también era escéptico sobre la trasmutación, y a la vez admirador y traductor de Aristóteles, aunque no dudaba en intentar llegar más allá del conocimiento aristotélico en su experimentación.

Toda esta ciencia árabe fue pasando a los cristianos, que a su vez la desarrollaron y ampliaron. No vamos a mencionar mas que algunos ejemplos, para recordar que la Ciencia se va construyendo de a poco y se va acumulando conocimiento, verdadero o falso, que fructifica más tarde. La respuesta puede ser equivocada, pero a lo mejor lo valioso es la pregunta, que define concretamente un interrogante para los investigadores que vienen después.

En el Renacimiento la Alquimia ya estaba muy extendida en Europa, y se seguían encontrando substancias nuevas. Entre otros muchos, podemos tomar como ejemplo a “Paracelso” que podría representar una figura de transición entre lo que sería la antigua tradición alquimista y el nuevo pensamiento científico. Paracelso se llamaba en realidad Aureolus Theophrastus Bombastus

von Hohenheim y vivió entre 1493 y 1541, en lo que son hoy Alemania y Suiza. Fue médico, botánico, alquimista, astrólogo y fundador de la toxicología. Su padre también era médico, y el principal interés de Paracelso era el estudio de la medicina, siendo sus excursiones en alquimia y toxicología motivadas por una posible utilidad médica. Paracelso era verdaderamente "bombástico" (parece que el término se tomó de su tercer nombre) cuando atacaba a sus detractores, o a las teorías que le parecían erradas. Quemó públicamente, en una plaza, los tratados de medicina de los clásicos griegos y romanos que no le gustaban. Y esto en una época que reverenciaba y casi endiosaba el saber antiguo. No es de extrañar que Paracelso durara menos de un año como docente en la Universidad suiza de Basel.

Era un hombre de bastante egolatría, y su seudónimo "Paracelso" lo eligió porque se consideraba "superior a Celso", uno de los médicos de la antigüedad clásica más renombrados. Su rebeldía frente a lo antiguo era en su momento una novedad, pero poco a poco iba a ser tomada por otros, cambiando el criterio de seguir a los antiguos, por el de buscar nuevos caminos. Recordemos que Paracelso nació un año después del descubrimiento de América, y su generación fue la primera en enfrentarse al hecho intelectual de que había todo un Continente del cual los filósofos Griegos no sabían nada. No es extraño que pensaran que había cosas nuevas y maravillosas por descubrir. Y es a partir de este sentimiento que nace la pequeña dosis de soberbia intelectual que subyace a todo descubrimiento científico: "No importa que haya habido genios en el pasado, no importa que hayan sido más inteligentes que yo. Hay cosas nuevas, hay cosas que yo puedo descubrir, porque nadie puede abarcar todo ni haber pensado todo." Y como errar es humano, y es posible buscar lo desconocido siempre, los genios anteriores no necesariamente son poseedores de la verdad absoluta, entonces resulta legítimo y útil seguir interrogando a la naturaleza.

Paracelso tenía el escepticismo moderno y soberbia intelectual de sobra. Descubrió la forma de aislar un metal nuevo, al que llamó Zinc. Su interés en los fármacos lo llevó a observar que había substancias beneficiosas o perjudiciales según la cantidad en que se ingerían. Esto se puede resumir en la frase "la dosis hace al veneno", uno de los fundamentos de toxicología que se deben a Paracelso. O sea que no hay substancias tóxicas, sino dosis tóxicas. Solo que la dosis tóxica para el arsénico es menor que para el alcohol, pero tomados en suficiente cantidad ambos son letales. Hasta el agua, en suficiente cantidad, mata. Por otro lado, Paracelso creía en los Elementos de Aristóteles y en los principios activos de azufre, mercurio y sal de los árabes. Sin embargo Paracelso sostenía: "Muchos dicen de la alquimia que es para fabricar oro y plata. Para mí ese no es el objetivo, sino la considero útil solo para conocer el poder y la virtud que puedan tener las medicinas." Aquí su pensamiento se manifiesta como más afín al de la química o la farmacéutica actuales, una tendencia que comienza a tomar fuerza a partir de esta época.

Paracelso vivió en lo que llamamos el comienzo del Renacimiento, una época de gran fermento intelectual. En las artes plásticas, empezó con el re descubrimiento del Arte Clásico Griego y Romano, pero también con el invento Renacentista de la perspectiva. Dibujar las cosas con perspectiva, una imagen tan común para nosotros como la doble fila de álamos que se va juntando hasta el horizonte, era desconocida en el arte. Algunos maestros italianos, como Giotto, la desarrollaron, inventando en el camino métodos geométricos nuevos. En Geografía es la época del descubrimiento Europeo de América, también hecho posible por el desarrollo de técnicas nuevas de construcción de barcos y navegación, comenzado por los Portugueses al fin de la Edad Media con Enrique el Navegante. En Religión comenzó el Protestantismo, con Martín Lutero y otros. Gutenberg inventó la imprenta por esa época, con lo cual comenzó la primer revolución en comunicaciones, al permitir la circulación de libros mucho más masiva y accesible que hasta entonces. Y por último, en ciencias, comenzó la llamada Revolución Copernicana, la primer Revolución Científica de una serie.

Copérnico no era Alquimista, sino Astrónomo y no escribió sobre los Elementos de Aristóteles, aunque puso en duda al gran filósofo de una manera muy diferente.

Así empezó la primera de las Revoluciones Científicas. Según el historiador de la Ciencia T.S. Kuhn en el saber científico se producen cambios fundamentales y profundos de tanto en tanto. Hay períodos en los que una dada Ciencia se desarrolla evolutivamente, haciendo descubrimientos cada vez más detallados o profundos, que Kuhn llama “Ciencia Normal”. Y hay períodos de cambios, las “Revoluciones Científicas”, donde se cuestionan y se renuevan conceptos que antes se daban por seguros.

Antes de Copérnico, se “sabía” que la tierra estaba inmóvil y el sol giraba a su alrededor. Según Kuhn esta idea era un *paradigma* de la astronomía anterior a Copérnico, y después de la “Revolución Copenicana” el paradigma pasó a ser otro, con la tierra girando alrededor del sol. Un paradigma es un poco más que una sola idea, es algo que engloba lo que se consideran como preguntas válidas en una dada ciencia. Por ejemplo, en la astronomía actual, post Copernicana, tiene sentido y es importante buscar sistemas solares fuera del nuestro, aunque sea muy difícil observar planetas en las estrellas lejanas. Esta pregunta, en cambio, casi carece de sentido en la astronomía que conocía Aristóteles, con la tierra fija en el centro del universo.

Nicolas Copérnico (1473-1543), aproximadamente contemporáneo de Paracelso, tenía una personalidad muy diferente. Ocupó cargos eclesiásticos y para él la Astronomía y las matemáticas eran casi una afición, aunque perseguida con tenacidad y empeño. Su libro *De revolutionibus orbium celestum* (Sobre las revoluciones de la Esfera Celeste) se publicó después de su muerte, no por prudencia de Copérnico, sino porque le tomó mucho tiempo perfeccionar esta obra monumental. Copérnico no defendía sus ideas vehementemente al estilo de Paracelso, pero estas influyeron en generaciones de científicos, notablemente en Galileo, Kepler y Newton que modificaron el sistema Copernicano hasta llevarlo a la imagen aceptada actualmente del Sistema Solar. El proceso fue largo (hay casi 100 años entre la muerte de Copérnico y el nacimiento de Newton) pero en lo esencial no se cambió el sistema heliocéntrico, el cambio más importante fue reemplazar las órbitas circulares de Copérnico por elipses (idea de Kepler), y encontrar el mecanismo (la ley de Gravitación de Newton) que mueve todo el sistema.

Ya que había cambiado tan drásticamente la forma conocida de la Tierra (con un continente nuevo) y la del sistema solar (con la Tierra destronada del centro del Universo) no es de extrañar que en esta época cambiaran otras ciencias, y este cambio fuera profundo. En gran medida también se modificó la *manera* de hacer Ciencia, y uno de los motores de este cambio fue un Alquimista anglo irlandés notable llamado Robert Boyle (1627-1691).

Hay varias características de Boyle que lo hacen un buen ejemplo de precursor del quehacer en Ciencia, mas cercano a la práctica actual que a la Ciencia Antigua o Medieval. Por empezar, adhirió de forma total y sin reservas al método experimental como manera de obtener resultados válidos. Por lo mismo, renegó del “Principio de Autoridad” como metodología. La sociedad Griega, en el fondo, era mucho más conservadora que la Renacentista y nada digamos de la actual. Recordemos que la vida tenía un ritmo más lento, y cambiaba muy poco de generación en generación. Los nietos, los hijos, los padres usaban la misma tecnología, y salvo catástrofes como una guerra o una invasión bárbara (siempre probables, es cierto) la sociedad permanecía bastante estática. Los Griegos tenían una leyenda, de que había habido una Edad de Oro, seguida por una de Plata y la propia época era la Edad de Barro. Es decir, simbólicamente los tiempos anteriores eran la Edad Dorada, donde los hombres habían sido más virtuosos y mejores. “Todo tiempo pasado fue mejor” era de alguna forma la mentalidad más extendida. Por eso era natural que sabios como Aristóteles no se cuestionaran. Habían adquirido, para la Edad Media, una aureola casi mística y se los consideraba infalibles. Por eso se estudiaban los clásicos, los sabios antiguos tenían un prestigio

que se negaba a los contemporáneos. Nadie era profeta en su tiempo. Esto encajaba bien en una sociedad autoritaria, jerárquica y donde se heredaban los privilegios de nacimiento y rango. La autoridad filosófica era análoga a la autoridad del Rey y la Religión.

Pero Boyle, criado en un país Protestante que había renegado de la autoridad del Papa, y siendo consciente de lo mucho que ignoraban los antiguos sabios, ya no confiaba en autoridades pasadas sino en interrogar la Naturaleza en forma directa. En esto seguía a muchos otros de sus colegas, casi contemporáneos, como René Descartes en Francia, Galileo Galilei en Italia o el inglés Francis Bacon. Todos ellos, consideraron la observación directa como superior a la autoridad de los filósofos antiguos. Boyle, además, era rico, y se podía dedicar a la Ciencia a tiempo completo, como una afición de hombre desocupado.

En esto también era bastante típico de su época, donde se puso de moda hacer ciencia entre aristócratas que podían darse el lujo de no hacer nada. Boyle tenía más talento que la mayoría y obtuvo resultados importantes. Nos interesa particularmente su investigación sobre el Aire, uno de los elementos de Aristóteles al cual llegó Boyle a través de su interés por la *falta* de aire, es decir del vacío.

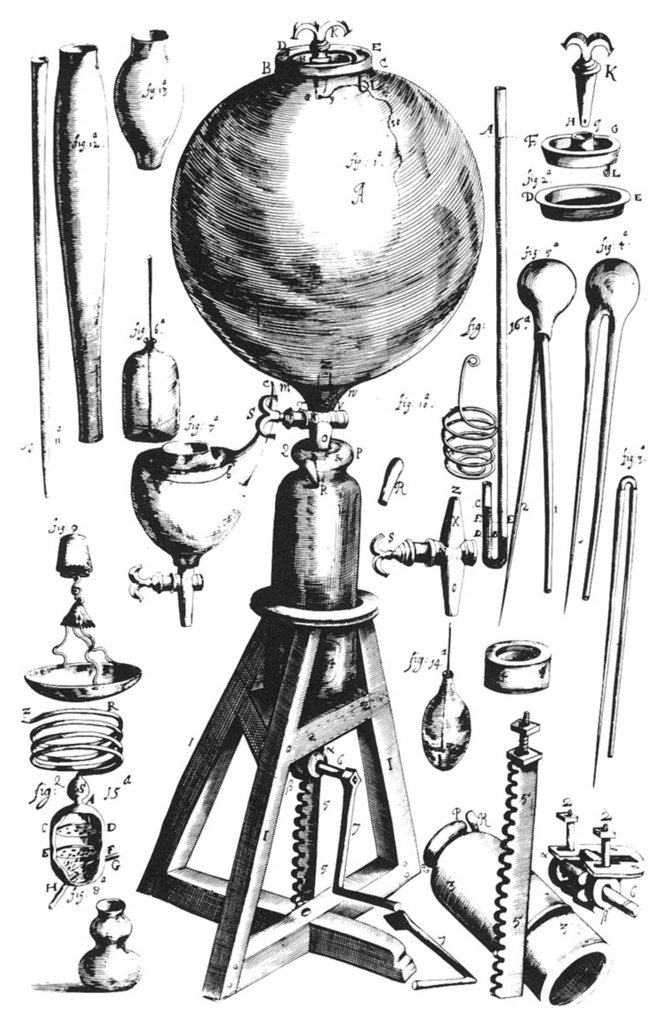


Figura 4

Bomba de vacío de Boyle y Hooke. La idea de hacer aparatos que produzcan condiciones inusuales en la Tierra, como el vacío tuvo gran impulso en el siglo XVII. En otros campos, como la óptica, se fabricaron telescopios y microscopios, más aparatos que amplían los horizontes de lo observable.

Una de las ideas de los Antiguos era que la naturaleza tenía “horror al vacío”. *Horror vacui* lo llamaban en latín, y suponían que no era posible producir un espacio sin nada dentro, como un

postulado auto-evidente. Por supuesto, un buen renacentista no iba a aceptar esto así nomas, y por lo tanto, en Alemania, Otto von Guericke otro contemporáneo de Boyle, consiguió fabricar una bomba que evacuaba el aire en un recipiente hermético y demostrar que la dificultad de lograr un vacío era fundamentalmente técnica, no era una imposibilidad de la naturaleza. Boyle se enteró de este descubrimiento y se puso a fabricar su propia bomba de vacío. Colaboró en esto Robert Hooke uno de los amigos de Boyle en la pequeña comunidad científica que existía en Londres alrededor del año 1600. La bomba de Boyle y Hooke era todavía mejor que la de von Guericke, demostrando la habilidad técnica del equipo inglés.

Boyle hizo varios experimentos con su nuevo aparato, pero además, quedó intrigado por las propiedades del aire. Fue al medir estas propiedades que hizo su descubrimiento más famoso. Se lo se conoce como la *ley de Boyle* entre los físicos angloparlantes, y como *ley de Mariotte,* para los francófonos. Pero antes de entrar en esta polémica sobre prioridades, veamos en que consiste la ley.

Es muy simple: dice que la presión del aire y su volumen, están relacionados en forma inversa. O sea que si se aumentamos la presión del aire al doble, su volumen disminuye a la mitad, si la llevamos al triple, el volumen va a ser tres veces menor, etc. Boyle hizo su experimento en un tubo de vidrio en forma de "U", con un extremo cerrado, y agregaba mercurio por el lado abierto. El peso del mercurio comprimía el gas, y el volumen al que llegaba se podía medir a través del vidrio. La presión también se calculaba con facilidad midiendo la altura del mercurio y sabiendo el peso o la densidad de este material. Un detalle importante de la manera de trabajar de Boyle, era justamente el detalle con que publicaba los aspectos más relevantes de sus experimentos.

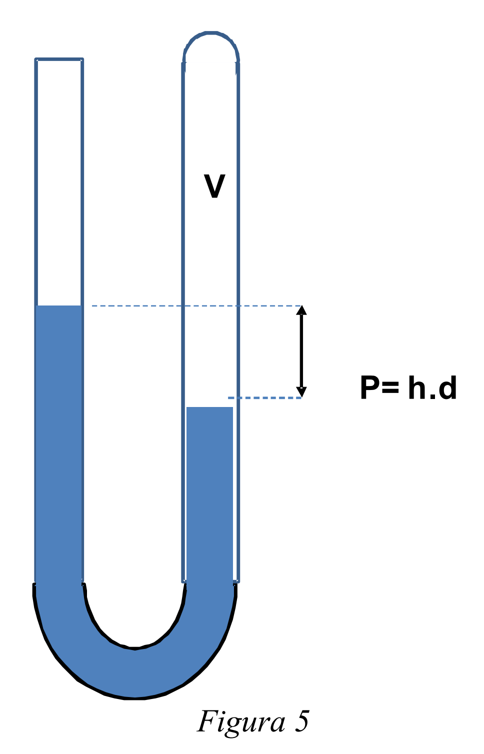


Figura 5

Esquema del arreglo experimental de Boyle. Se mide el volumen V y la altura h. Agregando mercurio se comprime el aire en el extremo cerrado. La presión está dada por h multiplicada por la densidad d del mercurio. El aparato de Mariotte era esencialmente el mismo.

Un aristócrata rico, como era Boyle, no necesitaba ocultar secretos comerciales, ni tenía miedo de que otros le robaran ideas para enriquecerse. Por lo tanto, podía darse el lujo de publicar todo, en forma clara. Su trabajo lo hacía por gusto, y para compartir con sus pares. También creía mucho más en los datos que en las interpretaciones. Por eso le interesaba trasmitir la forma de hacer las cosas y estaba contento si otros podían repetir sus experimentos. En esto fue un líder en su

época, iniciando una modalidad que continúa vigente en nuestro sistema científico. Boyle no estaba solo, y muchos de sus colegas adoptaron la costumbre de comunicar resultados, con detalles de cómo habían llegado a ellos. La imprenta ayudó también a que las ideas circularan y se fueran propagando masivamente, si se puede llamar masiva a una actividad que era más bien propia de una minoría de aficionados a la "Filosofía Natural" . No existía la palabra "ciencia". Para hablar del estudio de la Naturaleza y diferenciarla de la Metafísica, la Ética o la Filosofía pura se usaba el nombre de Filosofía Natural.

Boyle, entonces, puede tomarse como ejemplo de científico en el sentido moderno. Tanto por su método, basado en el experimento, como por su manera de presentar sus resultados y publicarlos. Además prefería su lengua vernácula, el Inglés, al Latín que se usó como "lengua universal" entre los estudiosos medievales. El siglo XVII puede verse como el punto de partida de la Ciencia Moderna. Galileo Galilei en Italia, René Descartes y Blaise Pascal en Francia, y muchos otros menos conocidos, empezaron a hacer experimentos y confiar en ellos como base del conocimiento de la Naturaleza. También muchos decidieron escribir en su lengua de todos los días, con lo cual perdían universalidad entre los que sabían Latín, pero llegaban a sus compatriotas no latinistas. En general, no renegaron de la concepción religiosa de la vida que primaba en su siglo, pero como lo expresaba Galileo, estudiar el mundo era una forma de conocer lo creado por Dios, y acercarse a Él por ese camino. El problema era que a veces se contradecía lo dicho en la Biblia, y a Galileo eso le trajo problemas con la Iglesia, que son bien conocidos.

La fama de Galileo es grande y es frecuente que se lo considere el precursor de la forma moderna de hacer ciencia, por lo sobresaliente de sus muchas contribuciones y porque defendió lúcidamente el método experimental. Sin embargo, no estuvo solo y gente como Boyle también salió en defensa de lo experimental de manera muy parecida, aunque menos conocida. No se debe olvidar que la Ciencia es una construcción colectiva. Lamentablemente, es muy difícil hacer justicia a todos los involucrados en un descubrimiento, ya que entrar en el detalle fino de cada controversia o descubrimiento científico resultaría muy difícil. Las controversias científicas suelen ser absorbentes, apasionantes y de vida o muerte para sus protagonistas, pero tediosas para el resto de los espectadores en el debate. De manera que se suele adjudicar todo el mérito a unas pocas figuras sobresalientes, y lamentablemente este texto no es una excepción. Hemos elegido algunos estudiosos destacados para personificar la evolución de las ideas más fundamentales, pero conviene recordar que esto es en cierta manera injusto y estamos olvidando a muchos que han hecho contribuciones que también son importantes.

Y hablando de injusticias, rescatemos el nombre de Edmée Mariotte, que descubrió la "ley de Boyle" casi simultáneamente, y por eso es más justo (y muchos textos lo hacen) referirse a la ley de "Boyle y Mariotte". Mariotte era francés, pero no un aristócrata. Su familia era acomodada, pero no tanto como para que Edmée pudiera vivir de rentas, por lo que optó por una carrera eclesiástica. Esta era una forma de ganarse la vida, y a la vez le permitía hacer ciencia, que también era su pasión. Hizo muchos descubrimientos en varios campos, por ejemplo notó el "punto ciego" del ojo. En el ojo, el lugar donde se implanta el nervio óptico no tiene las células sensoras de luz que existen en toda la retina. Normalmente no notamos esto, porque tenemos dos ojos, y uno compensa el otro. Pero tapándose un ojo, y mirando fijo una imagen (en un papel por ejemplo), se puede ver que algunos objetos en nuestra visión periférica "desaparecen" al alejarnos o acercarnos del papel. Algunos libros sobre ilusiones ópticas muestran este fenómeno, que parece haber hecho furor en la Corte de Francia a partir del descubrimiento de Mariotte.

Mariotte también participó en organizaciones científicas. Fue uno de los primeros socios de la "Académie des Sciences" recientemente fundada en Francia. Esto también era una novedad de la época, se comenzaron a fundar Academias y Sociedades Científicas. Boyle fue de los primeros miembros de la "Royal Society" de Inglaterra y Galileo de la "Academia dei Lincei" ambas equivalentes y contemporáneas de la Academia de Ciencias de Francia. Los Académicos se reunían

para intercambiar ideas y resultados, algunos eran comunicados o distribuidos por escrito, y de a poco se fueron editando revistas de aparición regular y continua, que siguieron publicándose hasta el siglo XX. Y continúan, aunque perdieron su denominación original al fundirse con publicaciones mas específicas de nuevas organizaciones científicas.

El caso es que Mariotte también se interesó por los gases, y de manera independiente, antes de leer lo que había escrito Boyle, reprodujo casi el mismo experimento. Lo escribió unos años mas tarde (la información circulaba mucho mas lento que ahora) pero quedan pocas dudas de que "no se copió" sino que la idea fue propia. Como en otros hallazgos, el experimento estaba maduro, y por eso no son raros los descubrimientos simultáneos. Mariotte hizo notar que la temperatura afectaba el resultado, y que el volumen del aire cambiaba notablemente con temperatura, aunque no cuantificó ese efecto. Aparecía aquí la conexión entre temperatura, volumen y presión de un gas, en este caso el aire, que iba a ser fundamental en el desarrollo de las ideas sobre el calor.

En tiempos de Boyle y Mariotte no había una buena manera de medir temperatura, aunque fuera fácil decir si hacía frío o calor. El problema es cuantificar nuestra sensación subjetiva. La cuestión fue resuelta un poco más tarde que la época de Boyle y Mariotte, por un fabricante de instrumentos científicos llamado Gabriel Fahrenheit.

La vida de Fahrenheit (1686 – 1736) transcurrió a caballo de los siglos XVII y XVIII, y por lo tanto se lo puede tomar como una figura de transición entre estos dos períodos arbitrarios de cien años en que dividimos la historia. Durante el siglo XVII se puede decir que se estableció el nuevo método científico, con Galileo, Descartes, Blaise Pascal, Boyle, Mariotte y muchos otros. En el tema que nos interesa, se avanzó indirectamente hacia los conceptos actuales de temperatura y calor. Se sentaron bases que fructificaron más tarde. Resultaron importantes el conocimiento de que se podía crear un vacío, de que el aire tenía propiedades físicas, y que la temperatura (científicamente mal definida, todavía) jugaba un papel en esas propiedades. Durante el siglo XVIII se discutió mucho sobre la combustión, el calor y la temperatura, y se aclararon algunos de estos conceptos.

Revoluciones en el siglo de las luces

El siglo XVIII fue llamado orgullosamente el "Siglo de las Luces" por la gente que vivió esta época. Fue un siglo de Revoluciones Científicas, además de terminar en una importantísima Revolución Política, la Revolución Francesa de 1789-1804.

Gabriel Fahrenheit, que cumplió 14 años el año 1700, no tenía forma de saber que estaba comenzando un período revolucionario, y su contribución principal fue la de perfeccionar un instrumento que existía en forma rudimentaria. Una contribución modesta, podría parecer, pero resultó ser una imprescindible llave para abrir el camino de nuevos descubrimientos. El aporte de Fahrenheit fue el de fabricar un termómetro preciso, repetible y confiable, además de inventar la escala de temperaturas que lleva su nombre y que aún se usa cotidianamente en Inglaterra y Estados Unidos.

La vida fue dura con Fahrenheit. Perdió a su padre y a su madre simultáneamente, por un envenenamiento accidental con hongos cuando tenía 15 años. Como consecuencia, lo pusieron de aprendiz de comerciante y fue a vivir a Amsterdam. Esto era práctica común en la época, y un aprendiz era poco mas que un sirviente, estando obligado a permanecer con su patrón quisiera o no. Pero Fahrenheit se rebeló contra ese destino, y tomando prestado dinero a cuenta de su futura herencia, se libró de su aprendizaje y entró en el mundo científico de Amsterdam, donde florecían fabricantes de instrumentos científicos. Su padre había sido un comerciante acomodado antes de los fatídicos hongos, pero Fahrenheit no era rico, y empezó a ganarse la vida como vidriero y fabricante de barómetros y otros instrumentos científicos. También comenzó una vida nómada, no enteramente por gusto, sino para escapar de la liga de comerciantes de su ciudad natal, que era Danzing, en la actual Polonia. En su época pertenecía a la poderosa Liga Anseática, una confederación de ciudades Alemanas unidas por el comercio. No les había gustado en Danzing que un menor de edad eligiera su destino y Fahrenheit tuvo que esperar su mayoría de edad, los 24 años según la ley de su ciudad, para poder asentarse tranquilo en Amsterdam. Mientras tanto, viajó por el norte de Europa escapando a sus con ciudadanos que pretendían enviarlo a sus colonias en las Indias Orientales como castigo. No lo atraparon, y pudo aprovechar sus viajes de huída para conocer el mundo y sus científicos. El danés Ole Romer fue uno de sus mentores. Romer era astrónomo pero también había desarrollado termómetros mejores que los primitivos "termoscopios" inventados en Florencia, durante los años en que Galileo vivía allí.

En realidad, el interés por evaluar la temperatura venía del siglo anterior, y ya Galileo y otros habían inventado instrumentos que indicaban la temperatura. Los llamaron termoscopios, y ofrecían una forma de saber si un cuerpo se había calentado o enfriado, pero no poseían escalas calibradas. Típicamente en Florencia usaban instrumentos con una escala definida por el día más cálido del verano y el mas frío del invierno, pero estos números no eran repetibles. Servían para evaluar la temperatura como algo menos subjetivo que nuestras sensaciones corporales y observar que algunas substancias cambiaban su volumen con la temperatura. Romer quería algo mejor que los termómetros modelo Florentino, y se dio cuenta que podía usarse un líquido como el alcohol, cuyo volumen cambia apreciablemente con la temperatura para medir la temperatura indirectamente, midiendo cambios de volumen. Se observaba el alcohol encerrado en un recipiente de vidrio con un tubo largo y delgado adosado. Al expandirse, el líquido se mueve en el tubo y la longitud resulta proporcional a la temperatura. Este es el esquema que todavía se usa en muchos termómetros, aunque viene siendo reemplazado por variantes electrónicas. Romer había calibrado su termómetro usando determinados "puntos fijos". Él usaba el punto de ebullición del agua y el de su congelamiento, dividiendo en 60 intervalos esta escala. Fahrenheit quedó fascinado con la idea de medir temperatura, y cuando volvió a Amsterdam dedicó su tiempo libre a perfeccionar el termómetro.

Pero tenía que ganarse la vida, y eligió el oficio de construir instrumentos para otros. Científicos ricos como había sido Boyle, le compraban barómetros y le encargaban piezas y recipientes de vidrio para sus experimentos. Los barómetros estaban de moda desde la época de Galileo. Evangelista Torricelli, discípulo de Galileo había inventado uno. Este aparato modelo Torricelli también fue usado hasta muy recientemente, y consiste en un tubo de vidrio de cerca de un metro de largo tapado en un extremo. Este se llena con mercurio y se invierte sobre una cubeta, también con mercurio. Uno esperaría que la columna de líquido se vacíe por su peso, pero en realidad solo baja hasta que su altura es de unos 76 centímetros sobre el nivel de la cubeta. La explicación de Galileo y Torricelli es que hay una columna de aire, mucho menos densa pero más alta, que empuja el mercurio. Como del lado cerrado del tubo no hay aire (el vacío que Guericke demostró que podía existir), nada empuja de ese lado. Por supuesto, si el tubo se rompe o se deja entrar aire de alguna manera en el espacio vacío, la columna cae.

La idea de Torricelli y Galileo es que estamos en el fondo de un océano de aire, y su peso es lo que empuja la columna de mercurio. Torricelli y Galileo habían medido la densidad del aire y estimado en unos diez kilómetros la altura de la atmósfera, suponiendo densidad uniforme, aunque Mariotte se dio cuenta con sus experimentos sobre la densidad y presión del aire que la densidad no podía ser uniforme. Comparaba el aire con una serie de esponjas apiladas, donde las de abajo están apretadas por las de arriba y por lo tanto comprimidas en un volumen menor. De esta manera, el aire, comprimido cerca de la superficie de la tierra, debía ser mas denso que el aire menos apretado de la atmósfera superior. No obstante estos detalles, la idea del mar de aire era buena.

Los barómetros se hicieron populares entre los aficionados a las ciencias desde el siglo XVII. Uno de los motivos fue un experimento famoso, crucial para confirmar la idea de que vivimos en el fondo de un océano de aire. La demostración fue emprendida por Blaise Pascal, en Francia aunque Pascal fue solamente el ideólogo del experimento. Dada su salud precaria, le escribió a su cuñado de provincias y lo convenció para que lo ayudara con la medición. Así, en septiembre de 1648, Florin Perrier, el cuñado de Pascal, se encontró en compañía de un burro y algunos ayudantes, subiendo la montaña del Puy de Dome en el centro de Francia. El burro llevaba el tubo de vidrio y el mercurio, que pesaban bastante. Perrier registró la altura del manómetro en la cima, en la base y en algún punto intermedio. Éxito total. Encontró que al subir, la altura de la columna de mercurio era menor, lo cual se explicaba porque la profundidad del océano de aire por encima de su cabeza era menor cuando estaba en la cima. Con este experimento estaba probado que el aire tenía una cierta profundidad. También se confirmaba que tenía peso, además de las propiedades de un resorte, como habían encontrado Boyle y Mariotte. El antiguo elemento de Aristóteles estaba siendo acorralado por los nuevos métodos cuantitativos de la ciencia, y pronto perdería su calidad de elemento y se dilucidarían sus propiedades frente a la temperatura.

Pero antes de eso era imprescindible conocer y cuantificar la temperatura, y a eso se dedicó Fahrenheit en Amsterdam, mientras fabricaba barómetros y objetos de vidrio. En este oficio estaba en inmejorables condiciones para perfeccionar el termómetro, y en realidad es un buen ejemplo de cómo las tecnologías se apoyan mutuamente y la ciencia va avanzando en base al desarrollo de instrumentos para medir cosas que sugieren nuevos instrumentos para medir otras cosas. Su experiencia con el vidrio le sirvió a Fahrenheit para fabricar los tubos de diámetro interno uniforme y pequeño que convenían a los termómetros. El líquido que está en el bulbo se expande hacia el tubo, y si este es de diámetro pequeño, la extensión del volumen expandido es mayor. Viceversa, si el volumen disminuye, la contracción de longitud es mas notoria en el tubo delgado. Con su experiencia barométrica, Fahrenheit también se enteró que para medir en un barómetro de mercurio con precisión, era necesario corregir la expansión del mercurio con temperatura. Por eso le habrá parecido natural usar mercurio en su termómetro, en lugar del alcohol de Romer.

Cuando llegó a un instrumento que le pareció satisfactorio, había producido los mejores termómetros de su época. El mercurio tenía la ventaja de ser más visible que el alcohol (aún

cuando el alcohol se tiña con tinta para facilitar la lectura) y además permitía llegar a temperaturas más altas (el alcohol hierve antes que el agua, así que el termómetro de Roemer era limitado). El problema de las escalas y los puntos fijos fue encarado también por Fahrenheit. Acostumbrados a la lógica decimal de la escala centígrada, los números elegidos por Fahrenheit parecen caprichosos, pero tienen su razón de ser. Como punto inferior de la escala tomó la temperatura más baja a la que podía llegar. Esto lo conseguía mezclando hielo, agua y sal amoniacal (cloruro de amonio) hasta saturar la solución. A esta temperatura le asignó el cero (son 17.7 grados centígrados bajo cero). El agua con sal disuelta tiene un punto de congelamiento menor que el agua pura, y se puede llegar a temperaturas más bajas que en los días fríos de Holanda, donde se hielan los canales. Como segundo punto fijo Fahreheit eligió la temperatura de un hombre sano, dado que supuso correctamente que esta temperatura era muy reproducible. Esto lo sabían los médicos, que usaban termoscopios para tomar la fiebre de sus pacientes desde que se inventaron estos aparatos. La importancia de la fiebre como síntoma médico era conocida desde tiempos inmemoriales.

Fahrenheit tenía así sus puntos fijos, y dividió la escala en 96 divisiones, o grados. Su agua con hielo y sal correspondía a cero grados, y la temperatura del cuerpo a 96, un número que se puede dividir de muchas maneras, por 2,3,4,6, 8 y 12 algo que a Fahrenheit le parecía útil. Sus termómetros resultaron precisos, y lo que era más importante, dos termómetros diferentes marcaban la misma temperatura, siempre. La reproducibilidad de un aparato de medición es importantísima, y no hay que subestimar el cuidado que hay que tener para que esto se logre. Fahrenheit usó sus termómetros para medir la temperatura a la que hervían varias substancias, y encontró que el agua hervía a casi 212 grados en su escala, y se congelaba a 32. Encontró que el punto de congelación del agua era reproducible, si el agua era pura, cosa contraria a lo que se creía en su época. Así que agregó un nuevo punto fijo, el de la congelación del agua pura, que se podía medir en los días de invierno del norte de Europa. Notemos que como no había heladeras ni método alguno de enfriar hasta congelar agua, era de rigor esperar el invierno para calibrar termómetros. La temperatura del cuerpo resultaba mucho más conveniente, para el punto superior ya que estaba accesible siempre, aunque después Fahrenheit la reemplazó por la del agua en ebullición a nivel del mar. Se dio cuenta de la importancia de la presión para el punto de ebullición, como buen constructor de barómetros, y por eso especificó el nivel del mar. En Amsterdam esta era la presión atmosférica ambiente y Fahrenheit no tenía que andar subiendo cerros como el cuñado de Pascal para calibrar su termómetro. Las nuevas definiciones cambiaron un poco la escala y por eso hoy en los países anglosajones 98.6 F es la temperatura donde uno ya no tiene fiebre (37 C en el resto del mundo).

Fahrenheit comunicó sus resultados a la Royal Society inglesa, y esta augusta congregación no tuvo pruritos a la hora de admitir a un plebeyo fabricante de instrumentos entre sus miembros. Los aristócratas y ricachones entre sus filas no tenían prejuicios al juzgar el saber, y eran una avanzada democrática en una sociedad estratificada que sin embargo iba cambiando. A través de la Royal Society, la escala Fahrenheit pasó a ser el estándar inglés y lo continúa siendo. Aunque en el Reino Unido se usa una escala dual, culpa de la Comunidad Europea, los hábitos mueren lentamente y la gente inglesa "entiende" mejor los números de Fahrenheit que los centígrados. No es extraño, a la gente criada fuera de estas islas, nos resulta difícil interpretar qué temperatura hace afuera si el pronóstico indica 32 F (hace un frío bárbaro, ya dijimos que el agua se congela a 32 F).

Con el invento de Fahrenheit se podía *medir* con precisión la temperatura, pero esto no nos dice que *es* la temperatura. La respuesta científica, es fácil: la temperatura es lo que mide el termómetro. Y un termómetro, ¿que es? Es un aparato que mide temperatura. Y ya está.

La definición circular es frustrante y parece que no nos dice nada útil, pero curiosamente tiene su mérito. Podríamos decir que esta manera de definir temperatura es básicamente una definición *operacional.* El termómetro se fabrica de cierta forma, controladamente. Sus puntos fijos pueden ser reproducidos por quien sea, y cualquiera puede también comparar su termómetro con

otros. Decimos de qué manera son las *operaciones* que hay que realizar para construir un termómetro y calibrarlo. Así se cuantifica controladamente una magnitud y todos están de acuerdo en sus valores numéricos. Estos números sirven después para encontrar *otros* fenómenos numéricos, como el hecho de que la temperatura de ebullición del agua es constante, a presión constante. Se encuentran también otras relaciones numéricas con magnitudes que cambian con temperatura. Más que entender o definir temperatura, se define un protocolo para medirla. Este es un viejo truco en Ciencia, y ha dado todo tipo de resultados útiles en más de una disciplina. La cuantificación y las relaciones entre mediciones de distintas cosas son una de las características mas salientes de la física y la química, y las leyes de estas disciplinas son fundamentalmente cuantitativas. Luego se pueden crear o inferir conceptos que ayudan a interpretar o entender los fenómenos, pero las relaciones empíricas y cuantitativas son a menudo un buen punto de partida.

Al estudio cuantitativo de la temperatura, se agregó durante el siglo XVIII el interés por el fenómeno de la combustión, o sea el Fuego, en la terminología Aristotélica de los Elementos. Claro que El Filósofo, como le decían a Aristóteles en la Edad Media, había perdido la autoridad casi mitológica que le habían dado en siglos anteriores. Surgió una nueva teoría, más empírica llamada del *Flogisto* para explicar el Fuego. La nueva hipótesis era mucho más racional y científica, aunque tuvo el defecto mortal de estar equivocada. Finalmente fue asesinada sin piedad por un científico notable, uno de los grandes genios de la ciencia llamado Antoine Laurent Lavoisier.

Lavoisier es considerado el *Padre de la Química* y no sin razón, porque sus contribuciones fueron importantísimas y causaron una verdadera revolución, como la de Copérnico, pero en la Química. Es una de esas figuras que terminan concentrando casi todo el reconocimiento científico de una época. Pero no olvidemos que la realidad es mucho más compleja y hay siempre un entorno de científicos, precursores, seguidores, y colegas que terminan de dar su verdadero valor a los descubrimientos de una persona. En particular, el propio Boyle, casi cien años anterior a Lavoisier podría ser considerado el último alquimista y el primer químico. Su libro *The practical Chymist* esbozaba ya la filosofía con la cual iba a moverse Lavoisier, y algunos de los métodos a partir de los cuales construyó el gran químico francés. Entre paréntesis, también el gran Isaac Newton, padre de la Mecánica, notable experimentador en óptica, puede disputar el nombre de último alquimista. En su vida dedicó mucho tiempo a la Alquimia, pero no publicó la mayoría de sus resultados, y su influencia, enorme en la Física, fue casi nula en Química.

Pero volvamos al Fuego. Para el siglo XVIII, cuando Lavoisier empezó a interesarse por la Química, ya existía una teoría científica para explicar la combustión, la teoría del *flogisto*. No era una mala teoría, en verdad explicaba bastante satisfactoriamente lo que ocurría cuando algo se quemaba, pero falló en los detalles, y como algunos dicen `Dios está en el detalle´. En este caso vendrían ser los detalles que surgieron cuando se puso a prueba la teoría con mucho más cuidado, midiendo cuidadosamente.

La hipótesis del flogisto postulaba que los materiales inflamables poseían siempre una substancia sutil, que se desprendía en la combustión, envenenando el aire. Esto impedía la combustión, a menos que se renovara el aire constantemente. La substancia fue llamada *flogisto*, a partir de la palabra griega para las llamas. No era una mala hipótesis, en el sentido que explicaba más de una reacción química. Incluso parece intuitivamente evidente. Al estar en una habitación mal ventilada con un fuego, *sentimos* que nos falta el aire, y muchas veces lo advertimos por el olor. De ahí que al aire "cargado de flogisto" se lo llamara "aire mefítico", por ejemplo.

La explicación moderna, concebida por Lavoisier es que en la combustión *una parte* del aire *se combina* con el elemento combustible y forma un nuevo compuesto. La parte combinable del aire es el oxígeno, y el aire es una mezcla de éste con el nitrógeno (que no se combina y queda como residuo). En cierta manera, una teoría es el opuesto de la otra, y el oxígeno actual podría ser una especie de "flogisto en negativo". Justamente una de las razones por las que se abandonó el flogisto

fue que al medir con cuidado, y *cuantitativamente* se encontró que para explicar los pesos de los reactivos y productos era necesario darle peso negativo al flogisto. Lavoisier insistía en pesar todo, y hacer un balance del peso de todas las substancias involucradas en una reacción. Hacer balances era muy natural para Lavoisier ya que se ganaba la vida como recaudador de impuestos, una actividad donde los balances contables eran de importancia capital.

Lavoisier pagó un precio alto por su profesión de recaudador, y como su vida está tan llena de logros y tragedias, entraremos en ella en un poco mas de detalle del estrictamente necesario para entender sus ideas científicas.

Antoine Lavoisier nació en la mitad del Siglo de las Luces, el 26 de agosto de 1743. Pertenecía a una familia acaudalada, habiendo recibido una importante herencia de su madre, que murió cuando él era niño. Estudió en un prestigioso instituto, donde se despertó su interés por las Ciencias Naturales. A los 21 años publicó su primer tratado sobre química, y tuvo un rápido ascenso dentro de la Academia Francesa de Ciencias, siendo elegido académico con 26 años. Más o menos por esta época, decidió asegurar su futuro económico participando como accionista de la *Ferme Generale,* o sea la *Granja General*, si traducimos el francés literalmente. Esta granja singular “cosechaba” los impuestos para el Rey. Un hombre con capital podía adelantar al erario Real (siempre ávido de dinero rápido) una cierta suma, y se resarcía con los impuestos que cobraba por su cuenta, con la venia del Rey. Es fácil de imaginar que este sistema era susceptible al abuso y nadie quería mucho a los socios de la Ferme Generale. Pero a Lavoisier le servía para vivir bien y poder dedicarse a la ciencia, que era su pasión.

Sus conexiones de la Ferme, además, le sirvieron para conseguir esposa. Marie Anne Paulze, más conocida como Madame Lavoisier es una de las primeras científicas que registra la historia y dedicaremos un espacio a esta mujer excepcional y a la manera en que se casó con Lavoisier. Era hija de Jacques Paulze, colega y socio de Lavoisier en la Ferme General. Paulze tenía un problema. Un noble con numerosas conexiones en la Corte le había hecho una oferta de matrimonio a su hija. Era claro por sus circunstancias y su carácter que el hombre estaba más enamorado de la fortuna del padre que de la persona de la hija. Marie Anne tenía doce años, pero ninguna duda sobre el candidato. Le parecía "un tonto, un rústico sin sentimientos y un ogro", que para colmo tenía deudas y casi el triple de la edad de Marie Anne. Ante esta situación, Monsieur Paulze pidió ayuda a su colega Monsieur Lavoisier, de 28 años, hombre serio y trabajador, para que lo sacara del apuro casándose con su hija. Contra lo que podría pensarse, este matrimonio arreglado resultó feliz. A los ojos de alguna mujer más frívola, la cantidad de tiempo que Antoine Lavoisier dedicaba a la ciencia podría haber parecido un serio defecto, pero Anne Marie abrazó de lleno la pasión de su esposo y pronto se convirtió en una colaboradora eficaz, aportando sus propios conocimientos.

Anne Marie había tenido una educación esmerada, como otras mujeres de su posición en el Siglo de las Luces. Se valoraba, dentro de algunos círculos, la inteligencia y el ingenio de la mujer. Los Lavoisier tenían lo que se llamaba un *Salon,* reuniones sociales donde se discutía sobre arte, literatura y otros temas. El de Antoine y Anne Marie tenía un sesgo científico y la anfitriona brillaba con luz propia. Pero también era importante dentro del laboratorio. Participaba plenamente del trabajo y aportaba su propio conocimiento, dibujando los aparatos utilizados para las páginas de las publicaciones, y traduciendo artículos del inglés para Lavoisier y sus colegas, que como buenos franceses, preferían ignorar la lengua inglesa. Las traducciones de Anne Marie ayudaron al grupo francés a conocer las novedades producidas en Inglaterra, en particular el descubrimiento de nuevos gases y la evolución de la teoría del flogisto.

Porque en Inglaterra también se hacía ciencia. Joseph Priestley y Henry Cavendish eran de los más talentosos entre los partidarios del flogisto. Químicos hábiles, como Lavoisier, hicieron descubrimientos importantes, entre ellos dos nuevos gases, o “aires” como los llamaban en la época.

La nomenclatura estaba ligada a la interpretación, y para entenderla conviene repasar un poco la teoría del flogisto. En primer lugar, y desde los alquimistas, se creía que los óxidos de los metales eran más simples que los metales mismos, por lo cual, se interpretaba que el óxido de hierro, el mineral que se encuentra en la naturaleza, se combinaba en la fragua con el flogisto provisto por el fuego de carbón y se formaba hierro metálico. El carbón se consideraba flogisto casi puro porque cuando se quemaba desaparecía casi por completo.

La interpretación actual es que el elemento puro es el metal. El mineral es óxido de hierro. o sea el mismo metal combinado con oxígeno. El carbón es otro elemento y al quemarse se combina con el oxígeno *y produce un compuesto gaseoso,* el dióxido de carbono, que se escapa al aire. Cuando carbón y hierro se juntan a alta temperatura, el dióxido de carbono adquiere su oxígeno en parte del aire y en parte del óxido de hierro, dejando libre al metal. Otro dato importante es que el aire es una mezcla, con 20 % de oxígeno (aproximadamente). Esta interpretación puede parecer más complicada que la anterior, pero explica mejor cosas importantes. Desentrañarla fue mérito de Lavoisier. Había que vencer el prejuicio de que el aire es un elemento, pero para eso ayudó el descubrimiento de nuevos "aires", hecho por los químicos ingleses.

Joseph Priestley era un clérigo inglés, completamente convencido de las ideas políticas que desembocaron en la Revolución Francesa, lo cual en su Inglaterra natal le causó problemas durante toda la vida. En una época vivió cerca de una fábrica de cerveza, y como sabemos, en la fermentación se produce un gran cantidad de gas, el que le da las burbujas a la cerveza. Picada su curiosidad científica, Priestley se puso a estudiar este *aire* y lo identificó con el llamado *aire fijo.* Se dio cuenta que no era respirable (poniendo un ratón dentro de una jarra con gas) y que era diferente del aire normal. Una vela se apagaba en él, no mantenía la combustión, y por lo tanto parecía saturado en flogisto. Era parecido, pero no igual, a lo que se llamaba en la época *aire flogisticado* y que hoy conocemos como nitrógeno. El nitrógeno era conocido como *aire flogisticado* porque si quemamos algo dentro de un recipiente cerrado, se consume el oxígeno y queda principalmente nitrógeno que no soporta más la combustión. Esto era interpretado, como dijimos, diciendo que se había liberado flogisto y "envenenado" el aire, cargándose de flogisto. Pero Priestley pudo demostrar que si bien su *aire fijo* y el *aire flogisticado*, no soportaban la combustión, no eran la misma cosa. En su época, sin las herramientas analíticas desarrolladas más tarde, ambos gases se diferenciaban en muy poco. Un gas no se puede tocar, agarrar ni ver, y si no tiene un olor o no provocan una irritación todos son iguales a nuestros sentidos. Pero con cuidado se podían pesar, y su peso era distinto. Otra diferencia crucial era que el *aire fijo* se disolvía en el agua. Hoy sabemos que el gas de Priestley es el dióxido de carbono, producido por las bacterias que fermentan la cerveza. Priestley no aceptó nunca esta nomenclatura (debida a Lavoisier) pero aprovechó el gas para inventar la soda. Se dio cuenta que haciendo burbujear el gas que se desprendía de la cerveza por agua pura, esta absorbía las burbujas y podía beberse. Cambiaba el gusto y para muchas personas este sabor resulta agradable. Por el descubrimiento se hizo famoso en su época, y fue reconocido por la Royal Society. La actual industria de las bebidas gaseosas le debe mucho a Priestley. La próxima vez que destape una gaseosa, dedique un momento a la memoria de este clérigo y científico inglés que inventó la soda.

Se fueron descubriendo cada vez más "aires". Henry Cavendish, otro inglés, que poniendo metales como el zinc en contacto con ácidos fuertes, encontró que se liberaba un gas nuevo. En la nomenclatura actual este gas es conocido como hidrógeno, pero Cavendish lo llamó *aire inflamable,* porque efectivamente se quema, dando una llama sumamente caliente. Mientras tanto, Priestley siguió trabajando con "aires" diversos y fue el primero en identificar lo que hoy llamamos oxígeno. Él lo bautizó *aire deflogisticado,* porque soportaba por más tiempo la combustión y un ratón sobrevivía más tiempo en un recipiente con este gas. Según la interpretación de Priestley esto ocurría porque el *aire deflogisticado* tardaba más en saturarse de flogisto y le permitía al ratón respirar mejor (se sacrificaron muchos ratones a la ciencia en esta parte del siglo XVIII). Por su

parte Cavendish siguió investigando y encontró también que su *aire inflamable* se podía combinar con el *aire deflogisticado* y formar agua. ¡Otro elemento, el agua, que no era tan elemental sino la combinación de dos gases! Hoy decimos que el oxígeno (O) y el hidrógeno (H) producen agua al combinarse, en la conocida fórmula H_2O.

Lavoisier usó estos datos y muchos más para imponer su interpretación. El flogisto tenía problemas, sobre todo si se hacían mediciones cuidadosas del peso de los reactivos. Por ejemplo, los metales puros eran más livianos que los óxidos, entonces si lo que ocurría era que el metal era óxido mas flogisto, el flogisto debía tener peso negativo. Lavoisier insistió en dos cosas, en medir con mucho cuidado y precisión, y en tomar en cuenta todos los productos de una reacción, intentando atrapar los residuos gaseosos, o haciendo la experiencia en recipientes cerrados. Este balance, igual a los balances contables que hacía como recaudador de impuestos, lo llevaron a postular esto de que "nada se pierde, todo se transforma", tal vez su frase más conocida.

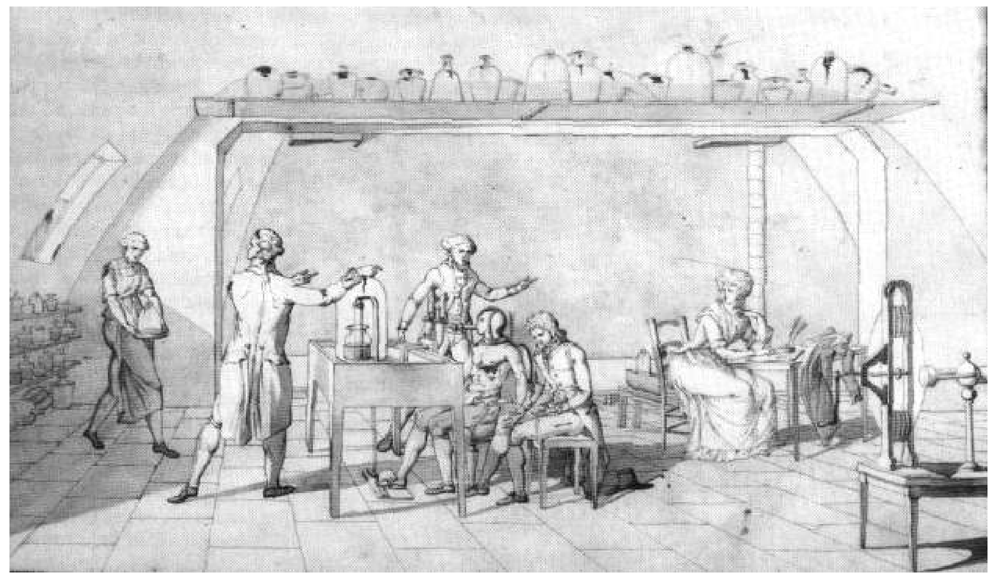


Figura 6

Experimentos de Lavoisier sobre respiración. El dibujo es de Madame Lavoisier que se autorretrató tomando las notas del experimento.

A través de sus experimentos cuidadosos entonces, Lavoisier llegó a la conclusión de que el aire era una mezcla de gases, que uno de ellos el *oxígeno* se combinaba con el carbón, la madera, vela o cualquier combustible, y se desprendía dióxido de carbono. La nomenclatura también fue cambiada por Lavoisier. Él mismo acuñó la palabra *oxígeno* y *azote* (que es la palabra francesa para nitrógeno). También acuñó la definición actual de los elementos químicos. Para Lavoisier, toda substancia que no puede ser separada en otras más simples, se considera elemental. Por esto se multiplicaron los elementos, y hoy, en lugar de los cuatro que tenían los griegos, reconocemos cerca de 100 elementos químicos. Notemos que, como vimos en la temperatura, de nuevo estamos usando una definición *operacional.* Si puedo separar una substancia en otras más simples, sé que no son elementales. Pero los procedimientos de separación cambian, y mejoran. Por eso algunos de los elementos de la tabla de Lavoisier se revelaron como substancias compuestas más tarde. Pero eso es un detalle, en este caso de menor importancia. "El diablo está en los detalles", (también es válida esta variante de la frase) pero en este caso los detalles no invalidan la definición operacional de lo que es un elemento químico.

Lavoisier tuvo tiempo de plasmar sus ideas en un libro, que tuvo una importancia enorme y fue verdaderamente fundacional para su ciencia, el "Traité Elemental de Chimie" que se publicó en 1789. Madame Lavoisier colaboró en todas las etapas del libro y las ilustraciones son suyas, ya que Anne Marie dibujaba bien. Había estudiado dibujo con Jacques David, el pintor de moda en la

Corte. Pero la Corte estaba destinada a desaparecer. El mismo año de 1789 en que salió el libro de los Lavoisier, el pueblo de París tomó la Bastilla y comenzó la vorágine de la Revolución Francesa, que iba a devorar también a Antoine Lavoisier.

Es difícil desde nuestra época calibrar cuan revolucionaria resultó ser la Revolución Francesa. La monarquía de Francia había durado más de mil años, y probablemente ni los propios revolucionarios pensaron que iría a desaparecer tan de golpe. Tampoco tenemos muy en cuenta lo incorporados a nuestra vida que quedaron sus principios. Hoy todos los sistemas políticos prefieren denominarse "democráticos", aunque sean de hecho dictaduras, y los Derechos Universales proclamados por Naciones Unidas son descendientes de los "Derechos del Hombre y el Ciudadano" que proclamó la Revolución Francesa. Es verdad que hay gran hipocresía en algunas de estas declaraciones de democracia, pero si "la hipocresía es el homenaje que da el vicio a la virtud" este contraste entre lo que se dice y lo que se hace es porque el " estado ideal" o la "idea pura" de lo que debe ser un gobierno es el de igualdad ante la ley, sufragio universal y mismos derechos para todos.

La práctica de hoy puede no alcanzar este ideal, pero en la época de las Monarquías Absolutas, los *ideales* eran distintos. Había dos categorías de gente: Los que mandaban y los que obedecían. Existía toda una serie de niveles para los que mandaban y lo normal era la jerarquía hereditaria. El Rey era la máxima encarnación del mando por eso su poder era casi absoluto, aunque limitado por lo que graciosamente había querido otorgar a sus súbditos. Tenía el derecho de vida y muerte o de encarcelar a cualquiera en La Bastilla, sin apelación posible. Por eso esta fortaleza concentró la ira del pueblo al comienzo mismo de la Revolución y la toma de la Bastilla tuvo un alto valor simbólico. El hecho de que unos plebeyos irrespetuosos (los que debían obedecer), desafiaran el poder de los Nobles (los que debían mandar) fue tomado como una afrenta imperdonable al orden natural de las cosas. Al Orden Divino también, porque la Iglesia en general apoyaba a la monarquía, en un trato que ayudaba a ambas partes a legitimar su poder. El concepto de que es el *pueblo* la fuente del poder y los gobernantes meros delegados de este poder popular era totalmente ajeno al espíritu y las leyes de la Monarquía Francesa, una de las más absolutas de su época.

Claro que las ideas democráticas nunca habían desaparecido del todo, por lo menos como ideas. Tampoco fueron inventadas por los franceses, derivan de los antiguos Griegos (otra vez ellos) y fueron mantenidas hasta en Roma. El Imperio era una República en el mundo de las ideas, aunque en la práctica el Emperador tenía poder absoluto. Lo que fue nuevo en Francia fue la extensión y profundidad que quisieron dar los revolucionarios a esta idea. Fue notable también lo explosivo del enfrentamiento entre el antiguo régimen autoritario con los ideales de *Liberté, Egalité, Fraternité.* Tal vez la virulencia se debía a la larga costumbre de mandar y obedecer. Desde tiempo inmemorial, cuando los que debían obedecer dejaban de hacerlo, cometían un crimen que se pagaba con la vida. Esto lo sabían ambas partes. Es natural entonces que se mataran entre sí con más encono que piedad.

Los primeros cambios fueron propuestos por la propia Monarquía, ya que las ideas habían ido cambiando antes gracias al trabajo de los llamados Enciclopedistas. Gente como Lavoisier adhería a ideas más democráticas, pero no imaginaron la violencia del cambio por venir. Muchos miembros de la Academia Francesa participaron en los comienzos de la Revolución. Proyectos como la implantación del Sistema Métrico Decimal cruzaron la línea demarcatoria de la toma de la Bastilla y continuaron aún en la República. Lavoisier continuó en sus múltiples gestiones como Académico a pesar de todos los cambios de la primera parte de la Revolución. Además de su ciencia y su trabajo en la Ferme, el Rey lo había nombrado al frente del organismo que fabricaba pólvora. Tanto Lavoisier como su mujer estaban encantados de poder tener el domingo para ellos solos, dentro del Laboratorio bien equipado del Polvorín. La administración Real había descubierto el valor de la Ciencia para la industria armamentista, porque un experto en química como Lavoisier pronto consiguió mejorar la calidad y cantidad de la pólvora Real, el insumo bélico principal de la

época. Y cuando llegaron los cambios, Lavoisier pudo seguir en su puesto. Muchos de los revolucionarios valoraban el saber, y muchos científicos estaban a favor de la Revolución y participaron en ella. La nueva República Francesa fundó importantes centros educativos, como las llamadas *Grandes Ecoles* que son hasta hoy los centros de formación profesional más prestigiosos de Francia.

Pero la etapa de Lavoisier como colaborador de la Revolución se acabó cuando llegó la etapa más dura, la del Terror de Danton y Robespierre. Los resentimientos antiguos contra los recaudadores de la Ferme Generale estallaron durante el Terror y diecisiete miembros de la Ferme fueron arrestados, incluidos Lavoisier y su suegro, Jacques Paulze. Todos los pedidos de clemencia de Madame Lavoisier y los pocos amigos que se atrevieron a mediar por él fueron inútiles. En mayo de 1794 Antoine Lavoisier fue guillotinado junto con Paulze y sus colegas de la Ferme. La etapa demente del Terror se cerró apenas meses después, en julio de ese año cuando fueron ejecutados Robespierre y su grupo. Poco antes de Lavoisier, en abril había sido el turno de Danton.

Las ideas de Lavoisier no murieron con él. Su Traité Elemental siguió siendo influyente, pero no fue su única obra. El matrimonio tenía planeada una serie de publicaciones cuando Antoine fue arrestado. Una vez que pudo recuperar sus manuscritos y notas Anne Marie tomó como suya la tarea trunca, y publicó las investigaciones hechas en conjunto. Antes de eso tuvo que superar el doble trauma de haber perdido padre y marido el mismo día, y algunos años de aislamiento y penurias como paria política. Cuando la Revolución se fue afianzando y aburguesando, Madame Lavoisier pudo reunirse con sus papeles. De manera que conocemos el trabajo de los Lavoisier a través de la pluma de Madame Lavoisier, aunque es imposible saber el alcance de las contribuciones originales de Anne Marie, ya que ella se situó siempre en segundo plano y concibió la obra como un homenaje a Antoine. Sin embargo es indudable que en su rol de recopiladora y comentarista ayudó a sentar las bases de una Revolución, esta vez Científica, en la Química.

Como resultado de este verdadero cambio de Paradigma, como diría Kuhn, se abandonó el Flogisto, se adoptó la nomenclatura de Lavoisier para muchos compuestos y los químicos adoptaron su definición operacional para identificar los elementos, aunque la lista original confeccionada por Lavoisier fue modificada más adelante. Conceptualmente, la modificación más importante se refiere a nuestra idea del Calor. Entre los elementos de Lavoisier figuraba el Calórico, un fluido imponderable que era responsable del flujo de calor entre los cuerpos calientes y fríos. El Calórico siguió el destino del Flogisto y murió en el siglo siguiente, cuando se investigó más a fondo este problema, pero eso queda para el siguiente capítulo.

Al fin del siglo XVIII entonces, se sabía que la combustión era una oxidación violenta, que liberaba calor. Se abandonaba definitivamente la idea del Fuego como ente elemental de la materia. El agua tampoco era elemental, pudiendo ser descompuesta, y el aire mismo era nada más que una mezcla de dos gases. Ya no había *aires* diversos sino gases y el aire resultaba ser una mezcla de dos de ellos, más algunos otros componentes menores que se fueron descubriendo de a poco.

Los *elementos* de Aristóteles desaparecieron de la Ciencia en el siglo XVIII, pero se reflotó pronto otra de las ideas Griegas, en este caso la de Demócrito y sus átomos indivisibles.

El hombre que no veía los colores, los átomos y más sobre los gases y la temperatura

El fin del siglo XVIII y comienzos del XIX estuvo marcado por grandes cambios políticos, la Revolución Francesa y las guerras Napoleónicas. Sin embargo, también fue una época de gran progreso científico. La República primero y Napoleón después, fundaron una serie de instituciones científicas que dieron un gran impulso a la ciencia en Francia. Las oportunidades que se abrieron a los antiguos plebeyos, ahora Ciudadanos, hicieron que surgiera una nueva generación de talentos. Otros consiguieron sobrevivir y aún medrar en los cambios de régimen sucesivos. Pierre Simon de Laplace, por ejemplo, no solo era un genio matemático, sino que pasó por todos los regímenes sano y salvo. Colaboró con Lavoisier para medir el calor desprendido cuando se hace ejercicio físico, pero consiguió eludir lo peor del Terror apartándose de París. Con Napoleón fue Ministro (muy brevemente) y cuando tambaleaba el Imperio supo congraciarse con la Restauración Borbónica y terminó ennoblecido como Marquis de Laplace. Madame Lavoisier se quejó amargamente del abandono en que quedó su esposo cuando cayó preso ya que muy pocos de la Academia salieron a defenderlo. Aparentemente Laplace era demasiado prudente, o inteligente, como para arriesgarse a defender a un colega de la furia de Robespierre.

Otro de los que logró eludir la furia del Terror fue Joseph Louis Gay-Lussac. Sobrevivió por vivir en provincias, y ser joven. Su padre, que había sido en algún momento funcionario Real, pasó un tiempo en prisión durante el Terror. Por suerte el Terror pasó y lo liberaron antes de que llegara a la guillotina. En esos tiempos revueltos la casualidad importaba en decidir vida y muerte de la gente. El interés del joven Gay-Lussac se centró en la ciencia, aunque para no llamar la atención prefirió enrolarse en la Escuela de Puentes y Calzadas, o sea como Ingeniero Vial, y no en la más prestigiosa Ecole Normal Superieure. De todos modos, la escuela era excelente, y con el tiempo Gay-Lussac se convirtió en un científico de renombre. A él le debemos la formulación de las leyes que gobiernan el comportamiento de los gases con la temperatura, unos cien años después de que Boyle y Mariotte dilucidaran la relación entre volumen y presión del aire.

A diferencia de Boyle y Mariotte, Gay-Lussac podía recurrir a termómetros precisos, que se fabricaban rutinariamente según el modelo fundacional de Fahrenheit. Con esto cuantificó el comportamiento de los gases con la temperatura, encontrando que un incremento de temperatura aumentaba el volumen de un gas en forma proporcional al aumento de temperatura. El hecho de que el volumen aumentaba al subir temperatura era conocido tiempo atrás, y el mismo Gay-Lussac enunció las leyes pero reconoció la prioridad de Jacques Charles, que lo había precedido en la formulación. Charles no la había publicado, porque estaba muy ocupado volando en globo.

El estudio de la expansión de los gases con temperatura no fue motivado por perseguir el conocimiento puro. Fue realizado para un problema práctico, si es que se puede llamar práctico al deporte de subir al cielo en globos de aire caliente. En este tema, la ciencia le debe agradecer mucho a los intrépidos aeronautas de fines del siglo XVII y principios del XIX.

Los pioneros en este arte riesgoso fueron dos fabricantes de papel, los hermanos Mongolfiere. Herederos de la fábrica de papel del padre, Etienne, el más práctico, incorporó a la fábrica la última tecnología de la época. Joseph, el más soñador, observó un día que el fuego encendido debajo de ropa puesta a secar, inflaba y levantaba las sábanas. Un día construyó una caja de papel grande, de cerca de un metro de lado, y encendiendo papeles por debajo observó que se levantaba hasta el techo. Con la ayuda del hermano, empezaron a aumentar la escala de sus experimentos. Esto era en el año de 1782, cuando todavía Luis VXI era Rey de Francia y parecía que la monarquía era eterna. Los hermanos decidieron demostrar el invento en público, para establecer su prioridad (el sistema de patentes era muy rudimentario). Desde el sur de Francia donde estaba la fábrica, se corrió la noticia de sus hazañas, y la fama los llevó a París. Allí hicieron sus demostraciones más espectaculares, donde el Rey y toda la corte fueron testigos. Un día en Versalles y con la Corte presente Etienne Mongolfiere consiguió levantar un pato, un gallo y una

oveja en el primer globo que llevó seres vivos, en un vuelo que recorrió unos tres kilómetros en ocho minutos y bajó suavemente. Los animales sobrevivieron.

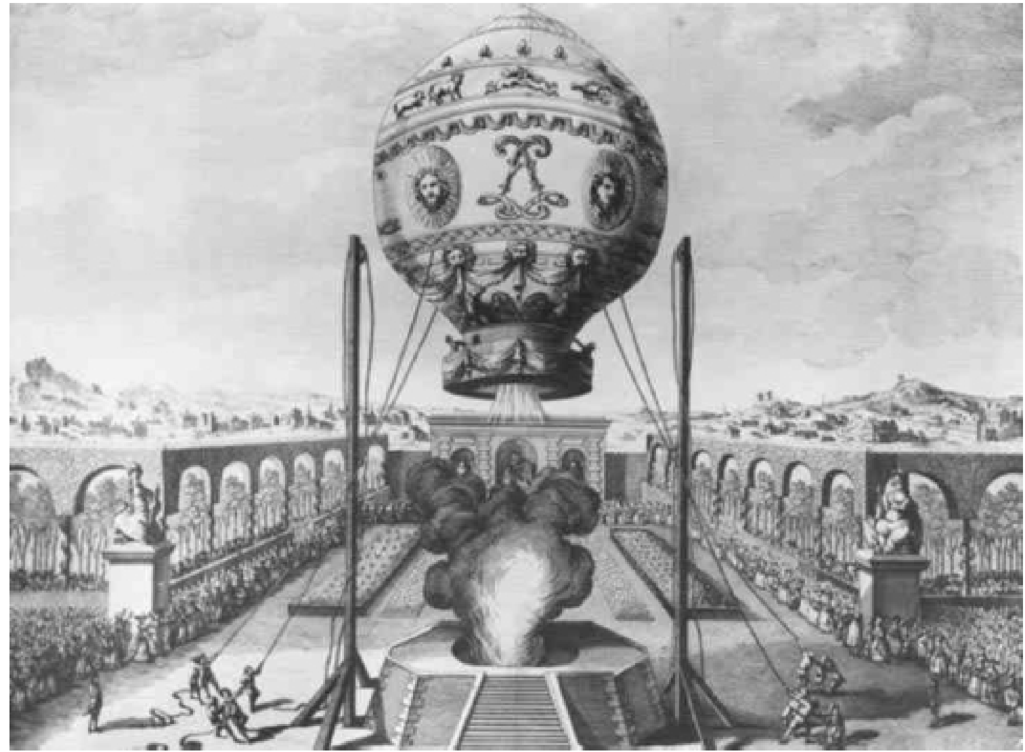


Figura 7

Globo de los Montgolfier. En este caso la figura lo muestra atado al suelo y tripulado. Como no había fotografías es difícil saber lo que agregó la imaginación del artista, pero en esencia el dibujo parece correcto. Puede verse la decoración del globo, el fuego y el soporte para el globo antes de ser inflado.

En París Etienne tuvo que asociarse con otro fabricante local de papel, y los diseños fueron cada vez de mayor tamaño y adoptaron una decoración a gusto del socio parisino. Finalmente realizaron en París las primeras ascensiones tripuladas por humanos. Etienne fue el encargado de subirse por primera vez a un globo atado. Luego se subió Pilatre de Rozier, otro entusiasta. Finalmente estuvieron listos para un vuelo libre. Sabían que la empresa era arriesgada y por eso tomaron siempre sus precauciones. El pato, oveja y gallo no fueron elegidos caprichosamente. La idea era comprobar como respondían los animales a la altura inédita que alcanzaba el globo. Por eso la oveja fue elegida por ser cercana al hombre en tamaño, el pato como control, ya que los patos vuelan por naturaleza y si algo le pasaba sería efecto del artefacto y no de la altura, y el gallo era un segundo control, ya que era un animal volador de baja altura. Como los animales salieron ilesos, se siguió con los hombres. Los voluntarios, Pilatre de Rozier y el Marqués d´Arlande rechazaron la sugerencia Real de que se probara primero con dos presos cualquiera. Prefirieron asumir el riesgo libremente y les fue bien. Recorrieron unos nueve kilómetros en 25 minutos de vuelo, y llegaron a una altura de unos 900 metros, aterrizando sin problemas.

Joseph Mongolfiere, el inspirador de la empresa no viajó a París. Era muy tímido y vestía demasiado descuidadamente para ser presentado a la Corte. No se registra si se decepcionó, pero están registradas sus ideas sobre la causa que elevaba los globos. Este hombre capaz de realizar la hazaña empírica, y hacer los primeros diseños de globos exitosos, imaginó erróneamente el motivo por el cual el invento funcionaba. Según su teoría, el fuego desprendía un gas más ligero que el aire, que bautizó "gas Montgolfiere". La explicación actual es que el aire caliente ocupa más volumen que el aire frío, y entonces desplaza una masa de aire atmosférico que pesa más que el aire

caliente. Por el principio de Arquímedes, se produce una fuerza de empuje que es igual a la masa extra de aire frío desplazada. El principio funciona igual en aire que en agua, la principal diferencia es que el aire frío o caliente pesa muy poco, con lo cual para producir el empuje suficiente para levantar una persona es necesario un globo muy grande. Un desafío tecnológico importante en el siglo XVIII, que los Mongolfiere fueron solucionando en pasos sucesivos, usando seda, papel y diferentes impermeabilizantes para sus globos. Ya que funcionaban todos con aire caliente, también era importante usar materiales retardatarios de las llamas, por si se prendía fuego el aparato.



Figura 8

Vuelo de J. Charles y N. Robert desde las Tullerías con el Louvre al fondo. No hay fuego ni aire caliente ya que el globo usaba hidrógeno y su tamaño era menor que el de los Mongolfiere. Según el artista había una gran multitud en el evento.

La fiebre de los vuelos en globo se extendió, a pesar del costo considerable del equipo y los riesgos de estar colgado a cientos de metros del piso en un globo de papel y seda. Uno de los interesados en este nuevo desafío fue Jacques Charles, que empezó a competir con los

Montgolfiere. Charles era matemático y físico, y procedió de manera más sistemática, pero llegó un poco más tarde. Consideró correctamente que era el calor, o mejor dicho, la expansión del aire lo que levantaba el globo. Para evaluar el empuje, necesitaba saber cuánto se expandía el aire al aumentar su temperatura, y por eso midió el volumen del aire para diferentes temperaturas. Como ya dijimos, encontró que si aumentaba algunos grados, dos por ejemplo, el volumen aumentaba una cierta cantidad. Si ahora aumentaba dos grados más, el volumen volvía a aumentar en la misma cantidad. Dicho de otra manera, el aumento de volumen era proporcional al aumento de temperatura. Sabía además que la diferencia de temperatura entre el aire afuera y adentro del globo no podía ser enorme, todos sabemos el papel se prende fuego si se calienta lo suficiente. Por eso Charles llegó a la conclusión de que se necesitaba un volumen muy grande de aire caliente para levantar personas. Los Montgolfiere también llegaron a una conclusión parecida ya que tuvieron que ir agrandando sus globos a tamaños enormes para llevar más carga. Pero tenían respaldo real y eso les permitía adquirir los materiales necesarios.

Jacques Charles, como científico activo, estaba al tanto del trabajo de Henry Cavendish, que había descubierto el *aire inflamable* (o sea nuestro hidrógeno) y además había medido con bastante precisión su densidad. Cavendish era un experimentador cuidadoso y encontró que su nuevo gas era unas 15 veces menos denso que el aire. Confiando en la exactitud de las mediciones de su colega inglés, Charles se dio cuenta que un globo lleno de *aire inflamable* podía ser ventajoso. Con esta estrategia, inició una carrera con los Montgolfier, ya famosos por sus primeros experimentos. El primer globo de hidrógeno fabricado por Charles, y no tripulado voló en agosto de 1783 y los Montgolfier hicieron su experimento con los animales el 19 de septiembre del mismo año. El primer globo Mongolfiere tripulado despegó y aterrizó exitosamente el 21 de noviembre. Por su parte, Charles y su compañero y socio, Noel Robert, hicieron un vuelo juntos en un globo de hidrógeno el primero de diciembre, diez días después. Charles nunca más subió a un globo, pero Robert, que había aportado los materiales y su experiencia práctica para fabricar el aparato, hizo algunas ascensiones más. Aunque el globo de Charles-Robert era más compacto (380 metros cúbicos contra 2200 del de Montgolfiere) llenarlo con hidrógeno era caro y lento. El hidrógeno se obtenía volcando ácido sulfúrico sobre deshechos de hierro, y hacían falta toneladas de ácido, que no era barato ni fácil de conseguir en esta época pre-industrial.

La actividad aeronáutica, como muchas otras, fue afectada profundamente por la Revolución de 1789. Cortada la fuente de mecenazgo Real, que había ayudado a los Montgolfiere en su empresa, se postergó considerablemente el progreso aeronáutico. En la época de guerra por toda Europa que siguió, Napoleón y otros evaluaron esta tecnología desde el punto de vista bélico. Pero la hora de la guerra en el aire todavía no había llegado, era todo muy caro, muy artesanal y muy poco confiable como para ser usado militarmente.

En 1804, ya plena época de Napoleón, Gay-Lussac tomó y refinó los resultados de Charles, por lo cual se llegó a formular en forma acabada, una de las leyes empíricas importantes en el desarrollo de la Termodinámica, una nueva ciencia que iba naciendo por esos años. El estudio del calor pronto tomaría una forma parecida a la que usamos hoy, aunque todavía se hallaba en estado embrionario, o fundacional, como quiera llamarse. La *Ley de los Gases ideales* es una ley empírica que sobrevive tal cual fue formulada. Resume en una sola la ley de Boyle-Mariotte y la de Charles-Gay Laussac. Es decir, en un gas ideal, si aumenta la presión disminuye el volumen, y si aumenta la temperatura aumenta el volumen. También, como corolario de los anteriores (y este es el añadido de Gay Laussac) si se aumenta la temperatura, a volumen constante la presión aumenta. El concepto de *gas ideal* se acuñó porque no todos los gases cumplían la ley estrictamente, y eso va a ser importante más adelante.

En la Inglaterra, acérrima enemiga de Napoleón, también se originaron ideas físicas importantes por esa época. Volvió a nacer la idea del átomo de Demócrito, esta vez en la mente de un Inglés, John Dalton, y como las ideas no viene solas, también un Italiano del Piamonte formuló

una hipótesis parecida. Y nuestro amigo Gay Lussac también hizo su aporte. El hecho de que varias personas lleguen a la misma conclusión no es demasiado raro en ciencia. La hipótesis de que los átomos estaban involucrados en las transformaciones químicas estaba madura. y surgió de los experimentos con los gases. Hubo multitud de "atomistas" pero destacaremos a los que expresaron las cosas más claramente y los que tuvieron la mayor repercusión más adelante.

Por ejemplo, Gay Laussac observó que al formarse un compuesto gaseoso, volúmenes de gases iguales se combinaban con volúmenes iguales, o con múltiplos de ellos y daban un compuesto gaseoso que también ocupaba un múltiplo del volumen original.

Basado en esto, y muchas otras regularidades químicas observadas, Dalton formuló sus hipótesis sobre los átomos de la siguiente manera:

1)Los Elementos están compuestos por partículas extremadamente pequeñas, que llamaremos átomos.

2)Los átomos de cualquier elemento dado son idénticos en tamaño, peso y otras propiedades, los de elementos diferentes difieren en tamaño, peso y demás propiedades.

3)No se pueden crear, subdividir o destruir átomos.

4)Los átomos de diferentes elementos se combinan de manera que las cantidades pueden expresarse como cocientes simples de números enteros.

5)En las reacciones químicas, los átomos se combinan, se separan o se re-organizan.

Los 5 puntos de Dalton son imprescindibles, hasta hoy, para comprender las reacciones químicas. Podemos destruir o hasta crear átomos en nuestros aceleradores, por eso la hipótesis 3) no es del todo verdadera, pero es tan difícil y costoso hacer esto, que en la práctica podemos ignorar esta excepción.

John Dalton fue un genio, y además el primer daltónico registrado en la historia. Dalton era ciego a los colores y tuvo la lucidez de reconocer esta falencia en sí mismo. Con la ventaja de ver el problema desde dentro, estudió y describió su enfermedad. Por eso, la condición es llamada Daltonismo y daltónicos a los que la sufren. Su vida fue mas bien tranquila, no se casó nunca y fue docente en Manchester, pudiendo dedicarse a la Ciencia y la enseñanza en una Inglaterra que, a diferencia de Francia, no sufría convulsiones sociales. Se interesó por la química y formuló su teoría atómica basado en los datos sobre gases y reacciones químicas que se habían acumulado hasta entonces. Llegó a gozar de un enorme prestigio como científico lo cual no ayudó a que se le prestara atención a Avogadro.

Por su parte, Amedeo Avogadro, era contemporáneo de Dalton pero había nacido en el Piamonte, en la actual Italia, que todavía no estaba integrada en un solo país. Por lo tanto, como ciudadano de un pequeño reino no estaba en el centro de la escena científica. Sin embargo, estaba al tanto de la ciencia de su época, y tuvo ideas parecidas a las de Dalton, pero con algunos detalles distintos. Lamentablemente se tardó bastante en reconocer que, justamente estos detalles, servían para interpretar mejor los datos experimentales.

Es difícil dar una idea de la complejidad de los datos, a veces contradictorios y confusos que existen en un dado momento en una ciencia y de como surgen las ideas detalladas que los ordenan y permiten una comprensión más simple y exacta del problema. La descripción se puede poner tediosa, interminable. Por eso en este texto describimos las ideas generales, sin ir mucho al detalle fino. Pero para dar una idea de un caso concreto, veamos como excepción cual era la diferencia en detalle entre las ideas de Dalton y Avogadro. Los dos partieron de la base de que había átomos, y Avogadro adhería a las hipótesis de Dalton (numeradas de 1.) a 5.) que vimos antes). Lo que agregó Avogadro, basado en la observación de Gay Lussac de que en las reacciones gaseosas se

combinaban volúmenes iguales (o proporcionales, según el caso), era que en un dado volumen de gas había la *misma cantidad* de moléculas. Esta hipótesis era importante, ya que permitía saber el peso relativo de los átomos, midiendo las densidades de los gases correspondientes. Pero Dalton veía una dificultad que le pareció insalvable en este razonamiento. Se podía ilustrar la dificultad con el ejemplo del vapor de agua. Veamos como razonaba Dalton.

La fórmula del agua es la muy conocida H_2O. Esto quiere decir que se combinan dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno para formar agua, en una reacción que Dalton hubiera escrito

$$2.H + O \Rightarrow H_2O$$

Los símbolos usados por Dalton eran otros, pero vamos a utilizar la convención actual, derivada de Lavoisier. Dalton usaba unos simbolitos muy bonitos pero poco prácticos. Es decir, que en esta reacción, un volumen de Oxígeno (O) se combinaría con dos volúmenes de Hidrógeno (2.H) y darían UN volumen de vapor de agua. Se sabía muy bien que si reaccionaban en esa proporción, el oxígeno y el hidrógeno se combinaban y no sobraba ni oxígeno ni hidrógeno libre. Pero cuando se calentaba el agua y se media su volumen, resultaban DOS volúmenes de vapor de agua (si nos ponemos *bien* detallistas, hay que medir todos los volúmenes por arriba de los 100 C, donde el agua está en estado gaseoso, o usar las leyes de Charles- Gay Lussac para comparar los volúmenes medidos a diferentes temperaturas. Tanto Dalton como Avogadro sabían las leyes de los gases y sus volúmenes debían ser evaluados teniendo en cuenta el efecto de la presión y temperatura). Para Dalton el experimento contradecía a Avogadro. Pero Avogadro podía explicar que hubiera más volumen de agua que el predicho por la fórmula que escribimos con una hipótesis adicional. La idea es sencilla, basta suponer que el oxígeno y el hidrógeno puros están formados por moléculas un poco más complejas que los átomos simples. Podemos postular que se combinan de a pares, formando conjuntos diatómicos que se portan como una sola partícula. En la época se usaba indistintamente el nombre de átomo o molécula, si se trataba de elementos, ya que muchos suponían que los elementos debían tener un solo átomo por simplicidad. Dalton, por principio, era partidario de usar las hipótesis más simples, y le parecía que un elemento formado por dos átomos pegados era una complicación innecesaria. Sin embargo, Avogadro no veía porqué la naturaleza tendría prohibido unir los átomos de a dos. Con esta premisa podía escribir la reacción que forma el agua así:

$$2.H_2 + O_2 \Rightarrow 2.\ H_2O$$

Aquí una molécula con *dos* átomos de oxígeno (por eso escribimos O_2) se combina con dos moléculas de hidrógeno (diatómicas también y por eso escribimos $2.H_2$) y esto da DOS moléculas de agua. Observar que la cantidad de átomos en los dos lados de la reacción son los mismos, y que hemos supuesto que al estar unidos, las moléculas de los elementos ocupan un volumen equivalente al de un átomo. Esto puede ser así porque un gas es casi todo espacio vacío. Es lo que permite que podamos comprimir tanto los gases, cosa que no podemos hacer con los sólidos o líquidos. Al evaporarse un líquido se obtiene un gas que ocupa cientos de veces más volumen, dependiendo de la temperatura final, pero siempre hay un aumento considerable. Se empezó a postular por esa época la idea, que parecía muy razonable, de que los átomos de los sólidos y líquidos estaban casi juntos y que al contrario, había mucho espacio libre entre los átomos de los gases.

En ese momento, no había una manera clara de resolver el dilema planteado entre la simplicidad que le gustaba a Dalton, y la posibilidad de poder agrupar los átomos de algunos elementos de a pares, como proponía Avogadro. Ganó Dalton por un tiempo, basado en su prestigio y su posición central en el sistema científico de su época. Pero Avogadro tuvo la última palabra. A la larga la hipótesis diatómica resultó ganadora cuando se fue investigando con más detalle (siempre los detalles, de Dios o del Diablo) y se comprobó que muchos elementos puros son diatómicos. Hoy se acepta que un volumen de gas, cualquiera sea su especie química, tiene el mismo número de moléculas que otro. Por ejemplo, sabiendo que el hidrógeno es el más ligero de

los elementos, se le adjudica un peso atómico de 1, la molécula entonces tiene peso molecular de dos y si tomamos dos gramos de hidrógeno tendríamos unas 6,022 x 10^{23} moléculas diatómicas de hidrógeno. El peso atómico del oxígeno es 16, entonces la molécula diatómica pesa 32 y 32 gramos de oxígeno también tienen 6,022 x 10^{23} moléculas. Este enorme número, 6 por 10 seguido de 23 ceros, se llama hoy número de Avogadro. A cero grados y presión atmosférica normal, ocupa 22,4 litros. Es decir que en un botellón de 20 litros vacío de líquido, tenemos más de 10^{23} moléculas mezcladas de oxígeno, nitrógeno, y otros gases que forman de aire. Es fácil ser multimillonario en átomos.

La imagen de un gas formado por una cantidad enorme de pequeñas partículas indestructibles, con mucho espacio entre átomos (o moléculas para ser más preciso) tuvo una enorme importancia como modelo para entender la naturaleza del calor y la temperatura.   Para seguir este desarrollo, veamos como evolucionaron las ideas sobre el calor.

A contrapelo de las reglas de la novela policial, contemos primero el final: El calor resulta ser un tipo especial de movimiento. Ahora expliquemos qué significa esta última frase, y cómo se llegó a formularla.

En el siglo XVIII, estuvo de moda la idea de los fluidos imponderables, es decir, elementos sin peso que podían fluir de un cuerpo a otro y cambiar sus propiedades. El flogisto era uno de ellos y algunos pensaban que no tenía peso, o que su peso era negativo. El peso negativo apareció un poco forzadamente y tuvo que ser usado por los partidarios del flogisto, como Cavendish o Priestley cuando la idea empezó a derrumbarse por los ataques de Lavoisier. De todos modos, el flogisto terminó desapareciendo, aunque sobrevivió el *calórico,* otro fluído imponderable.

Lavoisier, destructor del flogisto, conservó la idea de este otro fluido imponderable y elemental, el calórico. Como el flogisto, el calórico no podía pesarse ni verse, y su rol era causar los cambios de temperatura. Si ponemos en contacto dos cuerpos, uno frío y uno caliente, terminan adquiriendo una temperatura intermedia. Según la teoría del calórico, el cuerpo caliente tiene más calórico que el frío. Al ponerse en contacto, fluye el calórico hasta que ambos cuerpos tiene la misma concentración del fluido y llegan a una temperatura intermedia.

Lavoisier, experimentador innovador y cuidadoso hizo también un estudio detallado del calor, y no encontró razones para rechazar la idea del calórico. Interesado por el calor desprendido en la combustión, hizo muchos experimentos, incluso fue de los primeros en medir el calor desprendido por animales y personas al moverse, midió el aire inspirado y exhalado al hacer ejercicio, y llegó a la conclusión correcta de que la respiración es análoga a la combustión, ya que se consume oxígeno y se desprende dióxido de carbono y calor. Hoy sabemos que ese calor es en realidad una forma de energía, y no un fluido, aunque hay una cierta analogía entre energía y fluido imponderable.

En época de Lavoisier ni siquiera existía el concepto de energía que tenemos hoy en día. Este concepto y hasta su nombre se forjaron durante el siglo siguiente, el XIX. Pero las ideas y la motivación para encarar a fondo el problema de la conversión del calor en trabajo, empiezan a mediados del siglo XVIII, cuando se inicia la Revolución Industrial y se fabrican las primeras máquinas de vapor.

Así como vivimos todavía afectados por las ideas políticas de la Revolución Francesa, nuestra vida diaria y los objetos que usamos están irremediablemente ligados a otra Revolución, pero tecnológica y no política, que surgió también en el siglo XVIII y que se conoce como la Revolución Industrial.

A diferencia de la Francesa, no hay un hecho puntual y espectacular como la Toma de la Bastilla que defina el principio de la Revolución Industrial. Se podría tomar a la máquina de vapor de James Watt como el punto de partida, pero la verdad es que los cambios empezaron a gestarse antes, tal vez con la máquina de vapor menos conocida construida por Newcomen, o por las primeras fábricas que usaban la fuerza motriz de molinos de agua para mover sus máquinas. La historia es fascinante, pero compleja y larga. De hecho hubo poca interacción al principio entre la Ciencia y la Tecnología de la época. Los inventores como Watt o Newcomen eran gente práctica, empresarios o inventores más que científicos, y los lazos se fueron forjando a medida que la tecnología fue avanzando.

Hay muchos lazos de realimentación positiva entre ciencia y tecnología, y muchos entre las diferentes tecnologías. Thomas Newcomen construyó la primera máquina de vapor práctica en 1712 bien a comienzos del siglo de las luces, aunque él era de profesión herrero e inventor más que

intelectual. Es cierto que era predicador protestante, actividad más teórica si se quiere, pero esto no fue relevante en su rol de inventor. El hecho es que Newcomen empezó a construir máquinas para mover las bombas de agua en las minas de carbón, que antes eran movidas por caballos. La máquina fue un éxito, el negocio del carbón era bueno porque para esa época se habían talado gran parte de los bosques que proveían leña a Inglaterra y la gente empezó a usar el carbón para calentarse.

El aparato de Newcomen constaba de un gran cilindro vertical de unos dos metros de longitud y medio metro o más de diámetro. El cilindro se llenaba de vapor provisto por una caldera, había un pistón dentro del cilindro pero éste no era empujado por el vapor. El cilindro estaba contrapesado por una viga horizontal que lo levantaba al tope del recorrido. Una vez lleno el cilindro, se inyectaba agua fría, el vapor se condensaba, y bajaba la presión dentro del cilindro. Como la presión atmosférica exterior era más grande, el pistón era empujado hacia abajo. Luego se introducía vapor y el proceso se repetía.

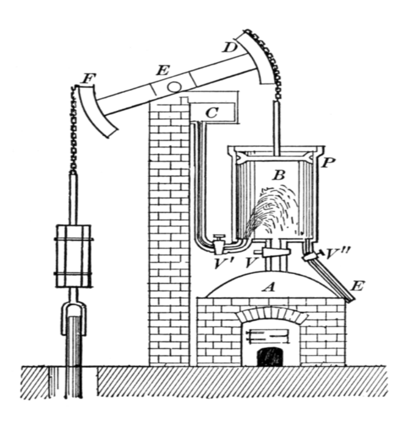


Figura 9

Máquina de Newcomen. La caldera (A) provee el vapor que llena el cilindro (B), luego se introduce agua fría por las válvulas (V y V´) y el vapor se condensa. Baja la presión dentro del cilindro y esto hace bajar una punta del balancín (D), levantando el extremo opuesto (F) donde está la bomba de agua.

Durante tres cuartos del siglo, la máquina de Newcomen se difundió por toda Inglaterra. La tecnología evolucionaba más lentamente entonces, y durante esos 75 años no tuvo competencia. Hasta que James Watt, fabricante de instrumentos científicos entró en esta historia. Un día le pidieron que reparara un modelo de la máquina que tenían en la Universidad de Glasgow. La máquina de Newcomen era muy ineficiente y Watt empezó a pensar en como mejorarla. La principal modificación de Watt fue poner un cilindro extra, conectado con una válvula, donde se condensaba el vapor. Con este truco, no había que enfriar el cilindro caliente donde entraba el vapor, y la máquina de Watt usaba menos combustible. Watt se asoció con un empresario, Mathew Boulton, y hacia la mitad del siglo XVIII comenzaron a fabricar diversos modelos.

Newcomen había sido un hombre práctico, y no analizó su máquina teóricamente. Watt introdujo la novedad de hacer algunos experimentos y mediciones más cuantitativas. Por ejemplo, estudió el problema del calor desprendido cuando el vapor se condensa en agua, que es el mismo que hay que entregar al agua para que se transforme en vapor. Este llamado *calor latente* de la transformación era el culpable de la ineficiencia del primer diseño. Ocurría que para condensar el vapor se inyectaba agua, esta debía enfriar todo, y para que se juntara vapor en el cilindro nuevamente, otra vez había que calentar el cilindro. La idea de Watt era mantener *dos temperaturas*

diferentes. Añadiendo un segundo cilindro y una válvula, la máquina operaba de la siguiente manera: se llenaba el primer cilindro de vapor, como antes, luego se abría la válvula y el vapor fluía hacia el segundo cilindro, que estaba frío. Allí se condensaba, liberaba su calor, y disminuía el volumen haciendo bajar el pistón, como antes. Luego había que cerrar la válvula, y dejar entrar de nuevo el vapor en el primer cilindro. Se tenía que enfriar el segundo cilindro, haciendo correr agua o usando un recipiente grande de agua alrededor, pero esto no era problema, y la complicación se compensaba con el combustible ahorrado.

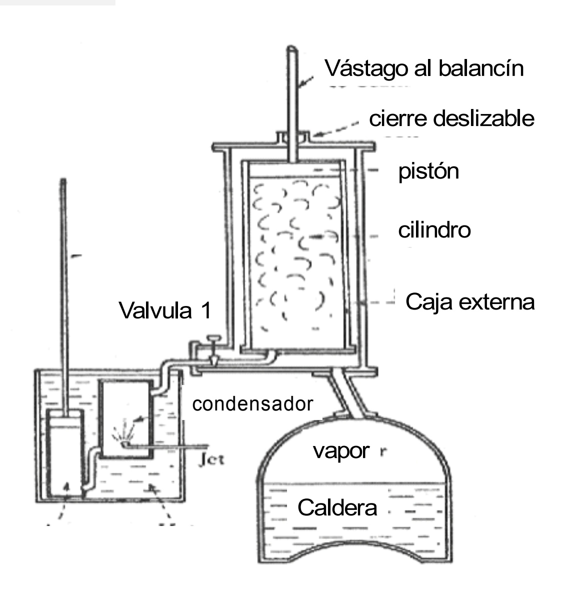


Figura 10

Máquina de Watt. Se agrega un segundo cilindro, el `condensador´, sumergido en un tanque de agua para enfriarlo, y a la vez este agua calentada se re-inyecta en la caldera, para producir el vapor más eficientemente. En lo demás el funcionamiento es parecido a la máquina de Newcomen.

Los diseños de Watt y Boulton se fueron haciendo más compactos y mejoraron aspectos de la fabricación, usando más hierro, y herramientas de mejor precisión que se fueron desarrollando a medida que surgía una industria metalúrgica. Una de las máquinas, por ejemplo, se ubicó en la acería de un tal John Wilkinson (la marca todavía existe, en hojitas de afeitar). Wilkinson encaró el desafío y encontró la manera de fabricar cilindros rectificados para las máquinas, lo cual era un problema no trivial para la época. Con el mismo diseño, las máquinas se hicieron mas eficientes gracias a este aporte de la industria mecánica porque los cilindros rectificados perdían menos vapor que los anteriores construidos a martillo. A su vez, la industria del hierro se benefició enormemente del carbón más abundante que se extraía gracias a las máquinas de Newcomen y Watt. Para producir hierro se necesita gran cantidad de energía, se quema mucha leña o carbón. La disponibilidad de hierro y carbón, fue facilitada por la máquina de Newcomen. A su vez, las máquinas más compactas y eficientes de Watt y Boulton, que podían emplear el hierro producido se abarataron y generaron nuevas industrias. El dominio del vapor fue lo que permitió en el siglo XIX el desarrollo del ferrocarril y los barcos de vapor, extendiendo la Revolución Industrial a todo el mundo.

Las máquinas que convertían calor en trabajo, y las mejoras en eficiencia plantearon dos problemas relacionados. El primero era encontrar la relación entre el calor suministrado y el trabajo

obtenido. ¿Que había en el fondo de este pasaje de calor a trabajo?. El segundo interrogante era cuál sería la eficiencia tope que se podía obtener, ¿cuánta leña o carbón hay que quemar para producir una dada cantidad de trabajo? Por su utilidad tecnológica urgía entender el calor y la eficiencia de las máquinas.

La idea de que el calor era un fluido, se empezó a cuestionar cuando se estudió mejor la trasformación de calor en trabajo. Y surgió una objeción importante cuando se estudió el problema inverso, es decir, producir calor mediante trabajo mecánico. Uno de los experimentos decisivos fue realizado por el Conde de Rumford, un personaje como pocos en la historia de la ciencia.

Rumford no nació Conde. Ganó su título a pulso, coronando una carrera multifacética de inventor, administrador, espía y traidor. Nació en 1753 y fue bautizado Benjamin Thomson en un humilde hogar de Massachussets, en lo que ahora son los Estados Unidos, pero en ese momento eran colonia de su Majestad Británica. Thomson, inteligente, trabajador y ambicioso, consiguió ir a la escuela parroquial y muy jovencito se casó con una viuda rica, mejorando su status social y económico. En ese momento estalló la Revolución, anterior a la Revolución Francesa, que derivaría en la Independencia y creación de los Estados Unidos. Thomson, como americano nativo, se enroló con los colonos los rebeldes, pero en secreto pasaba información para los ingleses. Fue suficientemente vivo como para ver a tiempo de que la Revolución triunfaría, y consiguió abandonar el país con las últimas tropas del Rey inglés. En Inglaterra pronto comenzó a codearse con gente importante, pero de nuevo hubo un escándalo y lo acusaron de ser espía Francés. La cosa no era tan clara y no lo condenaron, pero el caso es que Thomson se mudó a Baviera, un reino independiente de lo que hoy es Alemania. Parece que también allí pasaba información a los ingleses. A pesar de esto también trabajó eficientemente para el Rey de Baviera. En Munich, la capital del reino, diseñó un hermoso jardín, que aún se conoce como *Englischer Garten*, y organizó otras actividades. Una de ellas fue encarar el asunto de los mendigos de la capital, que eran un problema serio, no solo por la cantidad sino porque estaban organizados en una agrupación que no era fácil de manejar. La solución de Thomson combinó coerción y ayuda. Los obligó a trabajar, produciendo uniformes para el ejército, y a la vez construyó talleres modernos y les pagaba un salario razonable . Con esto equipaba al ejército y proveía a la vez empleo, dos pájaros de un tiro. El arreglo resultó tan bien que consiguió contratos para vender uniformes en ejércitos de otros países. Por estos servicios, el Rey Bávaro lo hizo Noble y Benjamin Thomson eligió llamarse Conde Rumford, en honor al pueblo de Massachussetts donde se había criado. Traidor a sus compatriotas, eligió el nombre de su patria chica para su título de nobleza.

En Baviera Rumford usó su inventiva y conocimientos científicos, ya que aunque era un oportunista político, su interés por la ciencia era genuino y profundo. Aprovechando ambas facetas de su personalidad, se ocupó de la producción de armamentos para el Reino. Una de sus actividades fue la producción de pólvora, como había hecho Lavoisier en Francia. La ciencia empezaba a ser reconocida como útil para la guerra en toda Europa. Y otra de sus tareas, en la cual obtuvo uno de sus resultados más famosos fue la fabricación de cañones. Los cañones de bronce de la época se fundían en una sola pieza, y luego se perforaba el cañón con un gran taladro vertical movido por caballos. Supervisando esta actividad, Rumford se dio cuenta de que se generaba una enorme cantidad de calor. Había que enfriar constantemente el bronce con agua para que las piezas no se arruinaran. También observó que el calentamiento se detenía cuando se detenían los caballos. De manera que Rumford se convenció que el calor no podía ser una substancia material, ya que se podía generar en forma arbitraria, a partir del trabajo de los animales. Rumford pasó a ser contrario a la idea del calórico como fluido. Imponderable o no, le parecía que una substancia que se podía generar en forma infinita no era algo razonable. No llegó a establecer la equivalencia entre trabajo y calor, ya que estos conceptos se desarrollaron un poco más tarde, pero estuvo cerca, y con su trabajo puso en duda la existencia del calórico.

Una vez que se hizo Noble y además rico, Rumford volvió a Inglaterra y allí se dedicó a la

ciencia también. Fundó la Royal Institution (diferente de la Royal Society que vimos antes) y se dedicó a mejorar la manera en que la gente usaba el calor, de manera práctica. A él le debemos el diseño de la llamada *cocina económica* que hoy es obsoleta, pero que era un avance para la época. En general la gente cocinaba en fuegos abiertos, colocando las ollas o sartenes directamente encima de un fuego de leña en algún rincón de la cocina. Rumford introdujo la cocina que aún hoy se ve en casas antiguas o en el campo. Un recipiente cerrado con horno incorporado y una chapa de hierro con agujeros que se pueden tapar o destapar para colocar más de una olla. Sigue usando leña, pero se puede emplear mucha menos. La mayor disponibilidad y menor precio del hierro, gentileza de Newcomen, Watt y los mineros de la época, que trabajaban en durísimas condiciones, hicieron posible esta innovación culinaria.

Un tiempo después, en 1804, Rumford visitó Francia. Allí conoció a Marianne Paulze, viuda de Lavoisier. Marie Anne había rehecho su vida y publicado la obra de su marido que había quedado trunca. Ahora volvía a tener su *Salon* y su vida social, como Madame Lavoisier, siendo ya una mujer madura. Rumford, que tampoco era un jovencito, quedó prendado de la viuda y los dos se casaron en segundas nupcias. En honor a su primer marido, sin embargo Madame Lavoisier insistió en conservar este nombre. Pero la cosa no funcionó, ya que Rumford era de carácter retraído y prefería dedicarse a la ciencia en soledad. Madame Lavoisier no pudo nunca compartir la investigación con Rumford, que a la vez no compartía la vida social de Madame. En poco menos de un año se separaron amigablemente. Rumford siguió viviendo en Francia, donde murió en 1814. Legó gran parte de la fortuna que había conseguido como cortesano, aventurero y espía para que se continuaran sus actividades como científico. Así, la medalla Rumford se sigue dando hasta la actualidad a trabajos que tengan que ver con el calor. La lista de ganadores de la medalla es impresionante, los jurados han sabido elegir bien a los candidatos. Madame Lavoisier sobrevivió a Rumford por unos cuantos años. Esta mujer notable, que tuvo un importante papel en la fundación de la Química actual y que estuvo casada con los hombres que destruyeron las ideas del flogisto y del calórico, murió a los 78 años en 1836.

Para comienzos del siglo XIX la idea del calórico estaba bastante desacreditada, pero se tardó años en construir una teoría nueva que satisficiera a todos. Esta nueva construcción conceptual, la Termodinámica, resultó sólida y fue excepcional porque resistió sin cambios las dos Revoluciones Científicas del siglo XX, la Mecánica Cuántica y la Relatividad. La evolución histórica de la idea fue complicada, porque hubo que definir nuevos conceptos, y la nomenclatura no era unívoca. Entremos entonces en el terreno un poco tedioso tal vez, de dar primero una definición de los conceptos actuales para entender mejor de qué estamos hablando.

En Física se suelen usar palabras comunes con un significado diferente, o más restringido, que en el habla cotidiana. Por ejemplo, el trabajo. Un trabajo puede ser rutinario, interesante, pesado, o liviano. Intelectual, manual, artístico, imaginativo, bien hecho, mal hecho, incompleto, magistral, y muchas calificaciones más cuando hablamos del sentido normal de la palabra trabajo. En Física se restringe el sentido de la palabra al puramente físico, y aún así, solo se lo define en términos de fuerza y distancia. Efectivamente el concepto se refiere a cuantificar el producto de una fuerza cuando la aplicamos recorriendo una cierta distancia, multiplicando fuerza por distancia.

Por ejemplo, imaginemos que levantamos un objeto pesado por medio de una palanca, como indica el dibujo:

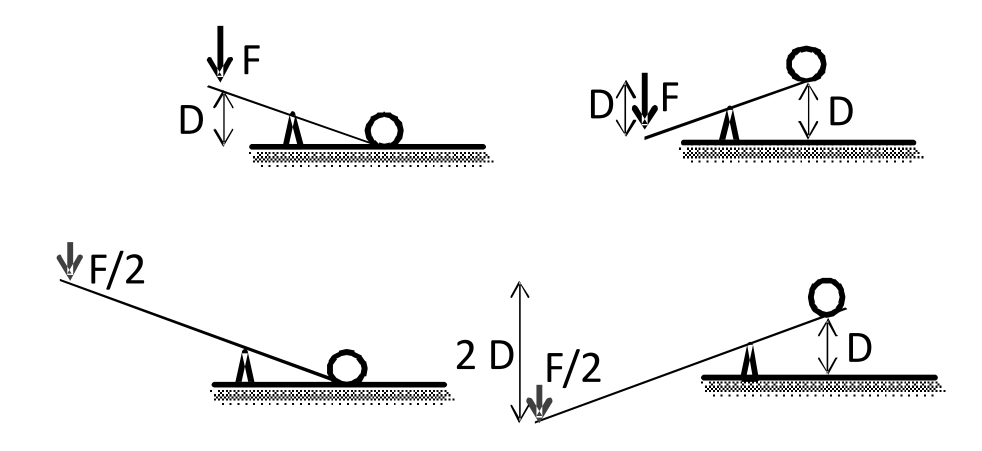


Figura 11

Arriba :Una fuerza F *aplicada a la palanca levanta un cuerpo a una altura* D*, recorriendo la misma distancia* D.

Abajo: Con una palanca más larga, del doble de longitud, es necesaria una fuerza menor F/2*, pero para llegar a la misma altura* D *se debe recorrer más distancia* = 2D. *El trabajo efectuado, o sea el producto* F.D =F/2.(2.D) *,es igual en ambos casos.*

Suponemos que levantamos un peso dado, a una altura D de su apoyo inicial. Para eso usamos una fuerza F justo la necesaria para levantar el peso y esta fuerza recorre la distancia D (figura superior) porque los brazos de palanca son iguales. Si ahora usamos una palanca el doble de larga, necesitamos usar una fuerza que es la mitad, o sea F/2 por las leyes de la palanca. Pero se ve del la figura (parte superior) que esta palanca más larga se debe mover una distancia doble, es decir 2. D. En el segundo caso la fuerza es la mitad pero la distancia es el doble, por eso el *trabajo*, en ambos casos es igual, ya que si hacemos el producto de fuerza por distancia obtenemos lo mismo.

También en principio se puede "volver a usar" este trabajo acumulado, si quitamos la fuerza y ponemos otro objeto en el brazo de la palanca, que sube si es un poco más liviano que el objeto original. Aquí se dice que el objeto levantado posee "energía potencial", y esta implica la posibilidad de realizar trabajo adicional, por ejemplo levantando otro peso. Notemos que en principio el objeto podría ser de igual peso que el original, solo que en el camino se pierde un poco. ¿Donde va esa energía que se pierde? La idea es que no se pierde sino que se transforma en calor. Pero eso estaba por demostrarse, en el siglo XIX, y hubo varios que llegaron a esa idea.

Pero antes de hablar de la transformación de trabajo en calor, veamos una segunda transformación, que podemos hacer con la máquina simple (y no demasiado útil) que dibujamos antes. Esta es la manera como funciona la Montaña Rusa del Parque de Diversiones.

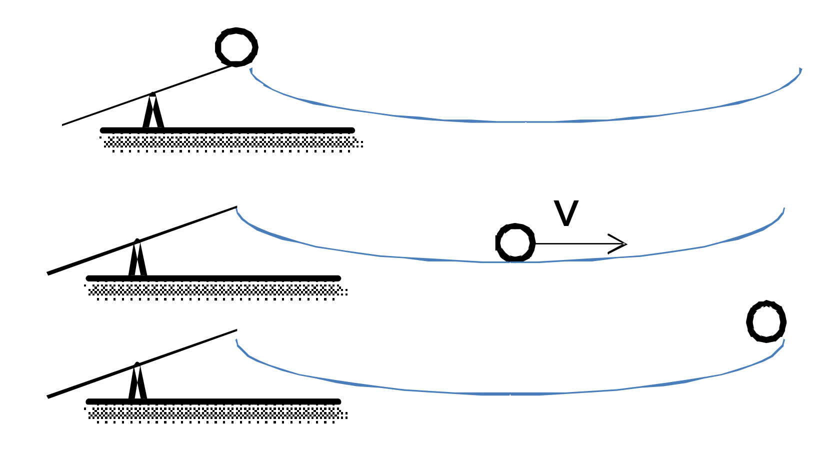


Figura 12

Ilustración de lo que ocurre cuando largamos la esfera por una rampa. Al llegar al punto medio, el mas bajo del recorrido, ha adquirido una velocidad v *que pierde al final del trayecto, cuando vuelve a recuperar la altura perdida.*

Cuando a la esfera que subimos con la palanca la largamos por una rampa, la gravedad la acelera y adquiere velocidad. En el punto más bajo del recorrido, ha perdido la energía potencial debida a la altura, pero en cambio su velocidad le sirve para volver a llegar arriba, donde nuevamente se detiene, pero recuperando su energía potencial. Es decir, que otra manera de levantar la esfera sería empezar abajo, acelerarla y construir una rampa que la levante. Incluso la rampa puede tener varias subidas y bajadas y el sistema funciona igual, esto lo usan las Montañas Rusas. Al principio una máquina levanta el carro, y después sube y baja por rampas de diferentes formas. Pero no se puede llegar a una altura mayor que la inicial, en la práctica el carro se va frenando, y las sucesivas colinas son cada vez más bajas. De nuevo culpa de la energía que se transforma en calor. En física a la energía del movimiento se la llama "energía cinética". En el fondo del recorrido, la energía potencial se transforma en cinética y al volver arriba vuelve a ser toda energía potencial. La esfera que dibujamos también podría volver a rodar para abajo, recorriendo de derecha a izquierda, volver a subir a la izquierda, etc...y si no fuera por la transformación en calor, esto duraría para siempre. Entonces, volvamos a la transformación en calor, y porqué decimos que el calor es una forma de energía.

Una de las personas que más hizo experimentalmente para demostrar que el calor es una forma de energía fue James Prescott Joule, un inglés que vivió en Manchester. Nacido en 1818, su padre tenía una fábrica de cerveza, y dada la precaria salud de James, fue educado en casa, en particular por el mismo John Dalton de la teoría atómica. Dalton consiguió interesar al joven Joule en la ciencia, y aunque Joule tuvo que hacerse cargo del negocio familiar junto con su hermano, consiguió trabajar en investigación en sus ratos libres. Contaba con un laboratorio construido con el apoyo de su padre y se puso a medir el calor desprendido por varios procesos físicos. No solo consideró el trabajo mecánico, sino el calentamiento producido por la corriente eléctrica, haciendo experimentos sumamente cuidadosos. Así encontró que una cantidad dada de trabajo mecánico se convertía siempre en la misma cantidad de calor. También fue el primero en medir cuanto calor se producía al circular corriente eléctrica por una resistencia, y esta "ley de Joule" es importante en los circuitos eléctricos.

En la época no había una nomenclatura uniforme, y se podía llamar "vis viva", al trabajo mecánico o "fuerza motriz" y también "energía mecánica". Finalmente, triunfó la denominación de energía, y hoy hablamos de cambios de energía, y no de "vis viva", aunque en sus orígenes griego o romano significaban más o menos lo mismo, siendo un término para la "fuerza vital". Por eso hablamos de que nos sentimos "llenos de energía", de que una persona es "enérgica", de la "energía

vital” de una persona. Sin embargo en física la palabra energía tiene un significado más restringido, y se refiere a eso que se intercambia cuando se cambia energía cinética en energía potencial, o en calor, o a la energía solar, por ejemplo que nos llega del espacio en forma de luz y calor del sol.

Los experimentos de Joule mostraban que había una conservación de energía, aunque esta se transformara en algo como el calor. También se sabía que no se podía sacar energía de la nada, por numerosos intentos previos de construir un “motor perpetuo” que habían fracasado. Entonces se formuló el principio de conservación de energía que dice que todas las formas de energía pueden intercambiarse unas en otras, pero la energía no se crea ni se destruye. Este es el llamado Primer Principio de la Termodinámica, y es una de las bases de nuestra comprensión actual del Universo. En realidad se extiende más allá de las fronteras del estudio del Calor (la Termodinámica significa justamente eso, el estudio del calor y sus transformaciones, o sea su dinámica). El principio de Conservación de Energía vale en Teoría de la Relatividad, en Mecánica Cuántica, en toda la Física.

Joule no estuvo solo en proponer la conservación de Energía, sino que un médico alemán, llamado Julius Robert Mayer tuvo ideas parecidas y también hizo experimentos, aunque menos cuidadosos o precisos que los de Joule. A los dos hombres les costó convencer al mundo de su idea. Ambos eran ajenos al mundo académico, y las presentaciones de Joule a la Royal Society no fueron muy reconocidas. Mayer también tuvo sus dificultades, pero después de unos años, en los que ambos lucharon contra el ninguneo científico, el tiempo de esta idea llegó. Si como dice Victor Hugo, “nada puede detener una idea cuyo tiempo llegó” , a la conservación de energía le llegó su tiempo dentro del mundo académico, de la mano de Hermann von Helmholz. Nacido en 1821 en Berlín, Helmholz también era médico como Mayer, pero desarrolló gran parte de su carrera combinando temas de fisiología y física. Era un genio capaz de abordar muchos problemas. Sus estudios de la audición son clásicos, y escribió un libro sobre el sonido que todavía vale la pena leer. En una época sin aparatos electrónicos desarrolló analizadores de frecuencia, y estudió el funcionamiento del oído. Otra área en que mezcló física y medicina fue al medir el trabajo muscular, con el calentamiento de los músculos al hacer ejercicio y fue en el curso de estas mediciones que concibió independientemente el principio de conservación de energía. La carrera de Helmholz se desarrolló en la Universidad de Berlín, que era una de las más prestigiosas de su época. Para mediados del siglo XIX, cuando Helmholz estaba evaluando la conservación de energía, el sistema científico alemán era de los más organizados de Europa, ya que había sido diseñado por los hermanos Alexander y Wilhelm von Humboldt gente de enormísimo talento. Llegar a ser Herr Professor en Alemania era garantía de haber demostrado una solidez y habilidad profesional extraordinaria, y Helmholz era de los Herr Professors más respetados. De manera que sus ideas, aunque fueron también resistidas al principio, finalmente fueron aceptadas por la comunidad científica.

Con la madurez de la idea, finalmente se reconoció la prioridad de Mayer y Joule. Joule además también contó al pasar el tiempo con un aliado “académico” importante en la figura de William Thomson. A pesar de la semejanza de nombre, Thomson no era pariente del Benjamin Thompson del que hablamos antes, el Conde Rumford. El apellido inglés Thomson y sus variantes, son bastante comunes y hay varios científicos importante de ese nombre. Pero a William Thomson se lo conoce mejor como Lord Kelvin, ya que también adquirió un título nobiliario. Joule y Thompson formaron un equipo exitoso, donde Joule proveía el talento experimental y Thomson el teórico. Juntos encontraron el efecto Joule-Thomson, pero eso lo veremos más adelante. El caso es que para la segunda mitad del siglo XIX, se tenía en claro el principio de Conservación de Energía, y una idea más acabada de lo que era el calor. Se homenajeó a Joule por sus contribuciones, bautizando a una unidad de energía como el *Joule*, equivalente al trabajo que se hace cuando una fuerza de un Newton recorre una distancia de un metro.

El hecho de que el trabajo mecánico, es decir el movimiento, generaba calor, llevó a la idea de que el calor no era otra cosa que movimiento. Pero movimiento a nivel atómico, al nivel

microscópico de los constituyentes básicos de la materia que había conjeturado Dalton. Al considerar el calor como movimiento atómico, o equivalentemente como una forma de energía mecánica se llega a la concepción actual de lo que son el calor y la temperatura.

Cuando Rumford perforaba sus cañones, o cuando nos frotamos las manos enérgicamente y se nos calientan las palmas, se convierte el movimiento del taladro o el de las manos, en agitación de los átomos que los componen. El rozamiento hace que se trasmita movimiento del cuerpo macroscópico que se mueve, a los átomos de este mismo cuerpo. El rozamiento en sí es un proceso relativamente complicado, ya que depende de cómo son las dos superficies que rozan, si son rugosas o lisas, con cuanta presión se aprieta, etc. Se puede generar otro tipo de energía, además de calor, por ejemplo sonido, como vemos en un taladro que suele producir chirridos bastante molestos. Pero en última instancia, las vibraciones y sacudidas llegan a nivel atómico, y esto lo sentimos en nuestra piel cuando nos frotamos las manos, como un aumento de temperatura. Y si contabilizamos todas las formas de energía vemos que no se ha creado ni destruido nada. La conservación de Energía viene a ser análoga al dicho de Lavoisier en química: En Energía, "nada se pierde, todo se trasforma". Y hoy sabemos que esta conservación es más fuerte aún que en la Química. Es posible aniquilar un átomo, y transformarlo en energía electromagnética, y luego re transformar esa energía en materia, destruyendo y creando los ladrillos básicos de la Química. Pero sabemos por Einstein que materia y energía son equivalentes y finalmente estamos en las mismas.

Para aniquilar y crear materia se necesita muchísima energía o temperaturas enormes, como en el Sol, Estrellas y Supernovas, pero la termodinámica trata en general con temperaturas más modestas. Y a las temperaturas en que vivimos, podemos que imaginar que todos los materiales están agitándose por la temperatura. Los átomos de nuestro cuerpo, de un pedazo de hierro, del agua que tomamos y del aire que respiramos, están agitados por la temperatura. ¿De donde viene esta energía que hace que todo se mueva? En principio del Sol, que produce enormes cantidades de energía que nos llega en forma de luz y calor durante el día. Y por suerte, también parte de esa energía se escapa durante la noche, de otra manera el planeta estaría demasiado caliente para que pudiéramos vivir. En este equilibrio, la cara que da al sol recibe energía y la cara que da al espacio abierto irradia a su vez al espacio infinito. Como la tierra gira igual que un pollo al spiedo, la temperatura tiende a ser uniforme, con variaciones que en realidad son bastante chicas. Hay mucha variabilidad porque la tierra es compleja, se generan vientos, corrientes en el mar y existe todo el fenómeno del clima. Pero aunque no nos parezca así, y tiritemos en invierno y suframos insolaciones en verano, la verdad es que la ventana térmica en la que nos movemos en la Tierra es bastante restringida.

Gracias a este equilibrio de frío y calor es posible mantener la infinidad de reacciones químicas complejas que mantienen la vida. Porque la temperatura, es decir la energía de vibración de los átomos y moléculas, lógicamente influye en todos los cambios tanto químicos como físicos que vemos a nuestro alrededor.

El concepto de movimiento permanente de los átomos por la temperatura ayuda a entender porqué se funden, se evaporan o se licuan diferentes materiales y porqué esto ocurre a diferentes temperaturas para cada material. Cualitativamente la cosa es sencilla, cuantitativamente es mucho más difícil. Ocurre que los diferentes átomos o moléculas de un material cualquiera se atraen entre sí, a veces más y a veces menos, según la substancia. Ya que el agua es un material en el que no es difícil observar el estado sólido, líquido o gaseoso, pensemos como ejemplo en un bloque de hielo. En el congelador, donde podemos imaginar que se formó nuestro pedazo de hielo, la temperatura es baja, y las moléculas tienen poca energía de movimiento. Las fuerzas de atracción entre moléculas, entonces mantienen el bloque de hielo bien unido. Los átomos están ordenados en posiciones fijas. Muchos sólidos forman estructuras ordenadas, llamadas también estructuras cristalinas. Por efecto de la temperatura, los átomos vibran con amplitudes pequeñas alrededor de su posición de equilibrio en el sólido.

Saquemos el hielo del congelador y dejemos que le dé el sol. Ya sabemos lo que pasa, después de un tiempo el cubito de hielo se derrite y tenemos agua. ¿Qué ocurrió a nivel molecular? La energía del calor solar aumentó el movimiento molecular. En algún momento se llega a cero grados centígrados, y las moléculas se mueven tanto que su energía de movimiento es parecida a la energía con que se atraen entre sí. El hielo se derrite y tenemos agua. La atracción todavía tiene importancia, por eso las moléculas siguen juntas, pero ahora es más fácil moverlas unas respecto a otras, y por eso el agua fluye. También es más fácil separar agua en gotas, que romper pedacitos de hielo. Por pensar en una analogía (parecida pero no igual, como pasa con las analogías) podemos imaginar una pila de naranjas, en forma de pirámide, como a veces ponen los verduleros arriba de una mesa. Si empezamos a sacudir la mesa, la pirámide se desarma, y las naranjas ruedan libremente. Si hay un borde para que no caigan al piso, es posible que terminemos con las naranjas rodando de acá para allá, y esto ocurre mientras sacudimos la mesa. En un líquido ocurre algo parecido, y por eso se derrama, pero la atracción molecular es más grande que en la analogía con las naranjas, y por eso el volumen ocupado por el líquido es similar al del sólido. La atracción entre moléculas del líquido las mantiene casi tan cerca como cuando estaban en el sólido.

Ahora tomemos nuestro hielo descongelado y pongamos el agua en un recipiente al fuego. De nuevo después de un tiempo, llegamos a cien grados centígrados y el agua empieza a hervir. ¿Que ocurrió a nivel molecular ? Ahora la agitación térmica es tan grande, que cada molécula puede despegarse de sus vecinas y salir "volando" por decirlo de alguna manera. Al cabo de un tiempo, el agua se habrá escapado completamente del recipiente y la habitación se habrá llenado de vapor de agua, es decir, de agua en estado gaseoso. Podríamos también llenar un recipiente cerrado con una pequeña cantidad de agua y levantar la temperatura, hasta pasar un poco los cien grados, y ahora mantener fija esta temperatura, en ciento diez grados, por ejemplo. Toda el agua se transforma en vapor, y este llena el recipiente. Nos podemos imaginar a las moléculas de vapor de agua, en estado gaseoso, chocando constantemente con las paredes. Estos choques representan una presión sobre la pared, y la temperatura (mantenida de alguna manera por un regulador imaginario) es la que constantemente suministra energía para mantener esa presión. Si le damos manija al regulador y aumentamos la temperatura, aumenta la frecuencia y energía de los choques y por lo tanto la presión. Ahora entendemos la ley de Gay Lussac-Charles que dice que aumentar la temperatura (a volumen fijo) aumenta la presión de un gas. No nos preocupemos cómo hace el regulador de temperatura, para fijarla, puede ser un aparatito electrónico tan "magico" como son los celulares o computadoras. El caso es que fijar temperatura es una técnica usual de laboratorio.

Podemos seguir imaginando, y ahora pensar que el recipiente tiene forma de cilindro, con un pistón que se puede mover sin que se escape el gas. A cien grados, la presión dentro del cilindro es igual a la atmosférica, y el vapor de agua llega a ocupar un cierto volumen. Si subimos la temperatura las moléculas aumentan su velocidad y frecuencia de choque y la presión aumenta como habíamos visto antes. Pero ahora el pistón cede, y el volumen aumenta. Esto hace que los choques se espacien más, porque el volumen aumentó. En algún momento, la energía trasmitida por los choques vuelve a ser como antes, y la presión en el cilindro es una atmósfera de nuevo. La presión externa de una atmósfera hace que la expansión cese y el pistón se detenga. Llegamos a un volumen en equilibrio, pero mayor que antes. Esta es la ley que descubrió Charles y publicó finalmente Gay Lussac. Ahora tenemos un modelo mental que explica porqué el gas se expande. Es la agitación térmica la culpable de la expansión y lo que mide nuestro termómetro es la importancia o la medida de esa agitación térmica. En los gases, la relación cuantitativa es sencilla, Presión y temperatura son proporcionales a volumen fijo, volumen y temperatura son proporcionales a presión fija, y a temperatura fija, el volumen es inversamente proporcional a la presión. Esto último se entiende pensando igual, con el mismo modelo. Si la energía térmica es fija, al achicar el volumen las moléculas golpean más seguido las paredes, lo cual significa un aumento de presión.

Hasta aquí todo bien, pero a pesar de que nos gustaría, no podemos calcular con precisión en

qué punto un material pasa de líquido a sólido o de líquido a gas. Esto es un problema complejo, porque tiene que ver con las fuerzas con que se atraen las moléculas o los átomos, y hay que comparar esa energía de atracción con la energía térmica. Todos los átomos tienden a atraerse si están suficientemente cerca y se repelen si están *demasiado* cerca como si fueran esferitas o cuerpos rígidos (casi rígidos en verdad). También sabemos que prácticamente todos los materiales pueden ser sólidos, líquidos o gases. Cosas sólidas como el hierro o el plomo, se derriten y se vuelven líquidos a suficiente temperatura (1500 centígrados para el hierro y 327 para el plomo) y un gas como el nitrógeno del aire se vuelve líquido a 196 grados bajo cero y sólido a 210 centígrados bajo cero aproximadamente. Como se ve, hay un rango grande de variación en las temperaturas de fusión y evaporación. Y si bien no es muy difícil tomar un material y medir a que temperatura se funde o se evapora, es muy difícil, o imposible, predecir teóricamente con un cálculo a qué temperatura ocurren estas transformaciones si sintetizamos un nuevo material en el laboratorio. Este es un desafío pendiente para las computadoras y los científicos del futuro, por ahora nuestro conocimiento solo permite estimar groseramente algunos ejemplos sencillos aunque esta es un área donde el progreso está siendo rápido.

En resumen el Primer Principio de la Termodinámica dice que la Energía no puede crearse ni destruirse, y por lo tanto la Energía del Universo es siempre constante. Es mucho decir, ya que no conocemos obviamente TODO el Universo pero hay tanta evidencia a favor de esta hipótesis que la tomamos como una de las piedras fundacionales del edificio de la Física. Como dijimos, otras ramas de la física usan la idea y el entrecruzamiento de resultados en todas ellas refuerza la validez del conjunto.

Considerando el calor como forma de energía llegamos a la respuesta de nuestra pregunta primera.

¿Que es el calor? Es una forma de movimiento molecular o atómico, una forma de energía que puede ser cambiada a otras formas. Por causa del calor hay un movimiento perpetuo, mientras se mantenga una temperatura fija. ¿Y la temperatura? Ahora podemos dar una respuesta menos circular que antes. Es una medida del grado de agitación térmica de los componentes microscópicos de un cuerpo. La seguimos midiendo con el termómetro, pero ahora sabemos que esa escala arbitraria nos indica una cantidad proporcional a la agitación térmica del cuerpo o el ambiente en que colocamos el termómetro.

Pero si hay un Primer Principio, debería haber un segundo. Efectivamente existe el Segundo Principio de la Termodinámica y lo vamos a describir en el capítulo siguiente. Es más sutil y más abstracto, y se descubrió prácticamente en simultáneo con el Primero. Trata de las transformaciones de Calor en Trabajo Mecánico y determina en forma fundamental la eficiencia de las máquinas.

***

Si queremos entender algunos detalles, que a algunos le parecerán Diabólicos y para otros mostrarán la mano Divina, hay que ponerse un (poco) más técnico. Esta parte técnica la mostraremos en un tipo de letra distinta y puede ser salteada por el lector que lo desee.

Para definir mejor el calor, o ponerle un poco de precisión a definirlo como "forma de energía" y nada más, conviene ver la forma en que se mide. Ya sabemos como se mide la temperatura, con un termómetro. La forma de medir es a la vez la definición `operacional´ de temperatura. Podemos medir en verdad el intercambio de calor, más que el calor en sí. Por ejemplo, si ponemos una cantidad de agua a alguna temperatura, por ejemplo medio litro a 80 C y la mezclamos con medio litro a 20 C, obtenemos un litro a 50 C. Hemos promediado la temperatura, porque las cantidades

de agua eran iguales. Si por ejemplo el agua caliente hubiera sido menos, la temperatura final también sería menor. Es decir que el calor intercambiado tiene que ver con la temperatura, y también con la cantidad de agua en cada caso. Si usamos otra substancia, por ejemplo medio kilo de hierro a 80 C y lo metemos en medio litro de agua (que pesa medio kilo)a 20 C, veremos que no llega a calentar el agua, mas que a unos 30 C . Y por supuesto se enfría el hierro a la misma temperatura. Dependiendo de cada material, su contenido de calor es diferente, para la misma masa de substancia. De manera que para cuantificar estas propiedades de los materiales, se definieron dos cantidades físicas. La ***caloría*** *es la cantidad de calor que eleva la temperatura de* ***un*** *gramo de agua en* ***un*** *grado centígrado. Comos se verá, es también una definición operacional dice cómo medir y cuantificar, pero no que* ***es*** *el calor. El* ***calor específico*** *de un material, es la cantidad de calor que hace falta para levantar su temperatura en un grado centígrado. Con esta definición el agua tiene un calor específico de una caloría por gramo y es de alguna manera la substancia de referencia. Hasta este punto se había llegado ya en la época de Lavoisier, y era natural identificar al calor específico como la cantidad de `calórico´ que podía llegar a tener un cuerpo. En realidad midiendo solo intercambios de calor es coherente pensar que el calor es una substancia, ya que la energía térmica que poseen los cuerpos es una cantidad fija que se intercambia. Sin embargo aparecen problemas cuando se hace un experimento como el de Rumford, de perforar cañones donde se genera calor, aparentemente sin límite. De ahí a idea de calor como forma de energía, que es generada por el trabajo de los caballos que mueven el torno.*

Los experimentos de Joule, además, mostraron que el trabajo realizado al mover una fuerza de 4,2 Newtons a lo largo de un metro, levanta la temperatura de un gramo de agua un grado centígrado. Esto es siempre así, sea el trabajo producido por una corriente eléctrica, por una piedra que cae, etc. Por eso se define el llamado ***equivalente mecánico de la caloría*** *como de* ***4,2*** *Joule por caloría (recordemos que se definió en honor a James Prescott Joule a la unidad de trabajo de un Newton por metro como* ***Joule*** *de ahí la coincidencia de nombres). La identificación experimental de calor generado por una cantidad dada de trabajo como siempre la misma es lo que convenció a los físicos de que el calor es una forma de energía. El identificar a esta energía como vibración o movimiento atómico tardó un poco más. En realidad es imposible medir el movimiento de los átomos o moléculas directamente, aunque hay formas indirectas, una de ellas las veremos más adelante cuando nos refiramos al llamado Movimiento Browniano.*

***

El hijo del `Organizador de la Victoria´ y las máquinas ideales.

La familia Carnot no era ilustre, ni tenía una antigua prosapia. Sin embargo en dos generaciones produjo dos hombres de talento excepcional. Si como decía el filósofo español Ortega y Gasset "yo soy yo y mis circunstancias", las circunstancias de la Revolución Francesa sacaron los Carnot del anonimato histórico y les permitieron ejercer el talento natural con el que fueron dotados.

Lazare Carnot nació en 1853 en Francia, hijo de un abogado de provincias. Se enroló en el ejército y tenía el grado de Capitán cuando estalló la Revolución Francesa. Durante la monarquía se empantanó en su carrera militar y se dedicó un poco a la ciencia, publicando algunas reflexiones sobre máquinas y temas militares. Fue Revolucionario desde el primer momento, y resultó elegido como representante de su ciudad a la Convención en París. Allí votó a favor de ejecutar al Rey y llegó a ser miembro del temido Comité de Salud Pública, cuyo jefe era Robespierre. En las horas más difíciles se encargó de organizar, equipar y reclutar los ejércitos de la República. Utilizó su experiencia militar y su enorme energía en la tarea, creando una conscripción en masa y resolviendo los mil problemas prácticos de entrenar y equipar tantos reclutas. Por eso se le dio el título de "Organizador de la Victoria", ya que los ejércitos de la Revolución resultaron victoriosos en toda Europa. Por su actividad en las campañas militares estuvo fuera de París en momentos del máximo Terror. Carnot se opuso a Robespierre en algún momento, pero participó en decisiones discutidas. Estuvo por lo tanto en el bando opuesto de Lavoisier pero ya se encontraba distanciado de los más extremistas en el momento en que cayó Robespierre. Cuando llegó Napoleón tuvo variadas actitudes. Primero ayudó a la subida de Bonaparte desde su posición dentro del gobierno. Luego, se opuso fuertemente a la acumulación de poder del personaje. Votó en contra de que lo nombraran a Napoleón Cónsul Vitalicio y luego contra su designación como Emperador. Pero luego de la caída y posterior retorno de Bonaparte, volvió a servir bajo sus órdenes. Con la derrota definitiva del Emperador, Carnot se exilió y murió en Alemania. Fue uno de los hombres que desarrollaron su talento gracias a las oportunidades que dio la Revolución. Durante el Antiguo Régimen es posible que Carnot hubiera languidecido en el Ejército como simple Capitán ya que no tenía los contactos necesarios para ascender. También tenía su faceta teórica. Antes de la Revolución escribió tratados militares y sobre matemáticas, y en su vejez como exiliado volvió a escribir sobre fortificaciones militares.

Su hijo, Nicolas Leonard Sadi Carnot no tuvo la actuación política del padre, ni fue reconocido en vida por su trabajo. Pero dejó una publicación perdurable, que a pesar de su importancia tardó en ser reconocida. La infancia de Sadi no fue fácil, estando marcada por los exilios y fortunas de su padre en la política, pero tuvo una excelente educación en la Ecole Polytechnique, creada durante la Revolución. La élite de Francia se educaba en esas escuelas y se sigue educando en estas mismas instituciones hasta hoy. Sadi tuvo como profesores a Ampere, Arago y Poisson, todos nombres ilustres dentro de la Física, y era un alumno brillante, habiendo entrado a la Ecole con 16 años, la edad mínima a la que se podía ingresar. El joven Carnot entró en el Ejército, pero para esa época la política había cambiado y su padre estaba de nuevo en el exilio. Su carrera se estancó, y pidió un retiro con media paga para dedicarse a la Ciencia, en una época en la que Francia produjo científicos notables y había por lo tanto un ambiente estimulante en París. Era también la época de las máquinas a vapor, pero en esto los Ingleses llevaban la delantera, y Carnot sentía que una de las razones de la derrota Francesa era la inferioridad de los diseños que se usaban en Francia. Estaba insatisfecho además por la manera en que se trataba el problema de entender la eficiencia de las máquinas. La mayoría de los Ingenieros que las diseñaban se basaban en la empiria pura. Habiendo sido expuesto a un método más matemático y riguroso en la Ecole Polytechnique, Sadi Carnot se puso a analizar la eficiencia con que se podía convertir Calor en Trabajo Mecánico, es decir prácticamente el caso opuesto al que se había dedicado Joule, el

problema que vimos en el capítulo anterior.

Carnot hizo un análisis sumamente abstracto. No se basó en ninguna máquina real, sino que definió una máquina ideal y un postulado central: No es posible obtener trabajo de una sola fuente de calor, una máquina debe operar con una fuente caliente y una fuente fría. En época de Carnot los ejemplos conocidos para la fuente caliente eran la caldera de la máquina de Newcomen, o de Watt, y para la fuente fría el agua que enfriaba el cilindro, el segundo cilindro externo en la máquina de Watt y único en la de Newcomen. Carnot concibió esta idea pensando a partir de una premisa errónea y lo increíble es que el resultado final fue esencialmente correcto y valioso. Partió de la idea del calórico, es decir de un fluido imposible de pesar (imponderable) pero que fluía espontáneamente de un cuerpo caliente a uno frío. Entonces concibió a la fuente caliente como si fuera el punto superior de una cascada, la fuente fría como el río abajo de ella, y la máquina térmica como un molino de agua que extraía trabajo de la energía potencial almacenada en la altura de agua. La caldera, el punto caliente tenía más calórico, que fluía al condensador, más frío y con menos calórico.

Además inventó lo que ahora se llama el ciclo de Carnot, usando el gas ideal como fluido para su máquina teórica. Con estos elementos y un razonamiento claro pero relativamente complejo, demostró cosas importantes. Por un lado, que su máquina ideal era la más eficiente posible. Por otro que su ciclo podía ser reversible. Es decir que según las condiciones de operación podía producir trabajo, extrayendo calor de la fuente caliente, pero parte del calor debía ser devuelto a la fuente fría. Con otras condiciones se podía hacer al revés, tomar calor de la fuente fría y proveyendo trabajo externo a la máquina, llevar ese calor a la fuente caliente. En una caída de agua se puede hacer algo análogo, una turbina que genera trabajo mecánico puede volver a levantar el agua si nosotros le proporcionamos trabajo moviéndola en sentido opuesto. Notemos que la máquina de Carnot usada “al revés” es un refrigerador, una máquina que no existía en su época pero que está sumamente difundida en la nuestra. Abra la puerta de la heladera y verá la fuente fría, escuche el zumbido del motor y ahí está la fuente de trabajo mecánico y atrás de la heladera hay una serpentina que sirve para largar calor a la habitación, que es nuestra fuente caliente. Acuérdese de Carnot (y no se olvide de Priestley) la próxima vez que saque una gaseosa fría de la heladera.

Tal vez el resultado central de Carnot fue el de evaluar la eficiencia de su proceso. Como había demostrado que su máquina ideal era también la más eficiente, puso una cota superior a la eficiencia que se podía obtener. Resultaba que la eficiencia dependía de la *diferencia* de temperaturas entre fuente fría y caliente. Esto es un buen dato para un ingeniero, haga su caldera lo más caliente posible, y enfríe la salida lo mas que pueda. Lamentablemente tanto los materiales como los combustibles limitan la máxima temperatura que se puede alcanzar, y hay muchas fuentes de ineficiencia térmica que hacen que a las máquinas reales les resulte imposible alcanzar incluso la eficiencia limitada del ciclo de Carnot. Pero es una meta y a la vez un límite que guía el diseño y la marca adonde es realista apuntar.

Carnot publicó su trabajo, cuyo largo título empezaba *Reflexions sur la puissance motrice du feu...*(Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego..) en un pequeño libro. Todavía se edita ese libro, hay traducciones al inglés y al español, pero en su época tuvo poca repercusión. La importancia de la obra no fue reconocida de inmediato, y Carnot murió joven, a los treinta y seis años en una epidemia de cólera. Su libro, publicado en 1824 fue rescatado del olvido por dos físicos importantes, pero unos treinta años más tarde. Estos hombres `solucionaron´ el problema de base que subsistía en el trabajo de Carnot, es decir el estar fundado en la idea errónea del calórico, y clarificaron lo que hoy conocemos como Segundo Principio de la Termodinámica. Sin embargo, el `ciclo de Carnot´ quedó firme y por suerte o por desgracia, los estudiantes de física e ingeniería lo encuentran en todos los textos de Termodinámica, materia obligatoria en cualquier carrera de estas disciplinas.

Los continuadores de la obra de Carnot fueron un Escocés que ya ha aparecido antes en este texto, William Thomson (o Lord Kelvin) y un Alemán, Rudolph Clausius. En realidad toda la historia es compleja, y no vamos a entrar en ella en detalle. Hubo discusiones de fondo, para aclarar muchos conceptos que no eran fáciles de precisar, pero no las pujas entre diferentes escuelas con ideas definidas, de esas que muestran controversias científicas tipo batalla campal. La manera de formular el Segundo Principio fue forjada entre varios, y como figuras principales elegimos a Clausius y Kelvin. Ambos son ejemplos de la clase de científico que empezó a ser típico a partir de la segunda mitad del siglo XIX y que es lo normal hasta ahora. Científicos profesionales, trabajando en una Universidad, dando cursos de Física y haciendo investigación en forma profesional. Quedaron atrás los tiempos de los aristócratas como Boyle, Cavendish o Lavoisier y más lejos aún la época de magos y alquimistas como Geber, Avicenna o Paracelso.

Rudolf Clausius nació en 1822, es decir era un bebé cuando Carnot publicó su trabajo. Estudió en Berlín y luego fue siguiendo la carrera Universitaria normal en la Alemania de esa época mudándose de una Universidad a otra. Estuvo en Zurich, Suiza pero donde se enseñaba en Alemán y luego en Wurzburg y Bonn. En 1850 publicó un artículo "Sobre la fuerza motriz del calor" en donde daba importancia al trabajo de Carnot, que además había sido comentado por Clapeyron, un francés cuyo trabajo era bien conocido de Clausius. De hecho, la ley de Clausius-Clapeyron es también un resultado importante que se refiere a la coexistencia de dos fases de la misma substancia (por ejemplo el agua y el vapor). Clausius se puso a la tarea de eliminar el calórico de la formulación de Carnot, pero continuó haciendo uso de las máquinas ideales y del ciclo inventado por Carnot. Si se considera al calor como forma de energía se pierde la sencillez de la formulación con el calórico, donde imaginamos algo como una cascada que necesita dos puntos, uno "alto" y uno "bajo" para realizar trabajo. Sin embargo, Clausius definió y nombró una cantidad, que él llamó "entropía". Esta juega un rol importante, aunque su definición es un tanto técnica, definiéndose cómo el calor intercambiado en una transformación reversible que produce trabajo, pero dividido por la temperatura a la que ocurre esta transformación. Uno de los descubrimientos de Clausius fue que en un sistema cerrado, la entropía aumenta o a lo sumo permanece constante. De manera que si el Primer Principio dice que la Energía se mantiene constante, una de las maneras de formular el segundo es que la Entropía crece siempre, cuando el proceso es irreversible. Y se mantiene constante en los procesos reversibles. Las dos fuentes, fría y caliente son necesarias porque de otro modo se podría diseñar una máquina que redujera la Entropía total en un sistema cerrado. Hay muchas maneras de formular el Segundo Principio, todas ellas equivalentes, pero no entraremos en los detalles técnicos. Baste saber que la idea funciona, y Clausius fue reconocido por sus colegas en vida.

Con el paso del tiempo se descubrió que la Entropía puede asimilarse al desorden que está presente en un sistema de átomos o moléculas. Por eso aumenta espontáneamente. En general es intuitivo que dejando que las cosas evolucionen por su cuenta se desordenan (pensemos en cualquier habitación de nuestro hogar...) y eso también es válido a nivel atómico. El ejemplo típico es el de un recipiente con dos particiones, en una hay gas y en otro nada. Si quitamos la partición, lo que ocurre es que el gas ocupa todo el espacio disponible, y se puede calcular que esto corresponde a un aumento de Entropía. Para que la Entropía disminuyera en forma espontánea, sería necesario que en algún momento todas las moléculas del gas se encontraran de un solo lado de la partición. Volvemos la partición a su lugar y obtenemos la configuración "ordenada" original. Sería muy raro que todo el gas espontáneamente se volviera a su sitio original, por eso decimos que la Entropía o el desorden molecular tiende a crecer.

William Thomson también anduvo detrás de los problemas que desvelaban a Clausius, y también intervino en la postulación del Primer Principio, trabajando con Joule. Fue un hombre polifacético y un niño prodigio, con gran facilidad para las matemáticas. Nació en Irlanda en 1824 pero se lo considera Escocés, ya que fue profesor Universitario en Glasgow, Escocia, durante 53

años. Su padre era matemático, y se mudó a Glasgow en la infancia de William, como Profesor de la Universidad. Thomson padre tuvo que criar a sus hijos solo, pues había quedado viudo y enseñó al joven William su materia, con tan buenos resultados que el joven produjo sus primeras investigaciones originales en matemáticas con solo 16 años. Lo mandaron a estudiar a Cambridge, la más prestigiosa Universidad del mundo angloparlante, y ganó un concurso importante en matemáticas, lo cual fue suficiente como para que lo tomaran como Profesor en Glasgow a los 22 años. Enseñó hasta que se retiró a los 75 completando 53 años de docencia en la misma Universidad. Sin embargo también viajó durante toda la vida y la docencia le dejaba bastante tiempo para investigar. De joven pasó una temporada en París, en el Laboratorio de Regnault, un científico francés interesado en la termodinámica. De ahí que Thomson se familiarizara con la obra de Carnot, y estuviera entre los descubridores o clarificadores del Segundo Principio. Más adelante se asoció con Joule, como vimos, para dar su apoyo académico a la idea de conservación de Energía, es decir el Primer Principio. La ayuda de Thomson fue importante para Joule ya que él estaba por fuera del mundo académico, siendo de la raza mas antigua de los científicos amateur. Sin ser un noble ocioso, su trabajo para ganar el pan lo hacía en la fábrica de cerveza de la familia.

Como ocurre en Ciencia, resolver una pregunta trae otros interrogantes. Una vez clarificada la naturaleza del Calor y la Temperatura, Kelvin apareció con otra pregunta, o deberíamos llamarla una observación nueva y original que sugería algo a investigar. Surgió así: Mirando los datos de los experimentos de Charles acerca del cambio de volumen del aire con temperatura, y de mediciones equivalentes en los otros gases que se fueron descubriendo, Kelvin reparó en el hecho de que todos los gases disminuían su volumen en la misma cantidad para un dado salto de temperatura. A cero grados centígrados, si se disminuía la temperatura en un grado, la disminución de volumen era de 1/273 del volumen original. Si se bajaba otro grado se obtenía la misma reducción, y así siguiendo parecía que al bajar a 273 grados bajo cero, el volumen del gas sería de *cero.* Podría haber sido una casualidad para un solo gas, pero esto se daba en todos. ¿Que ocurriría entonces a -273 grados centígrados? Eso no se sabía, ya que los mejores métodos de la época estaban muy lejos de llegar a enfriar tanto. Pero era un desafío, los 273 grados bajo cero parecían una frontera a la que era interesante llegar. Kelvin, de cualquier manera no tomó literalmente su conclusión de volumen cero. No era eso lo que esperaba. En realidad su interpretación se basaba más en la Energía que en el volumen, y lo que propuso era que las vibraciones que aparecen en cualquier material debido a la temperatura, iban a reducirse a cero al llegar a los 273 grados bajo cero. Es decir, que a - 273 grados el movimiento térmico cesaba. Ya que la temperatura es una medida del movimiento térmico, era lógico concebir que si sacamos más y más energía a un material, finalmente la agitación térmica iba a detenerse. A eso lo podríamos definir como energía cero, la mínima temperatura que tendría sentido definir (más quieto que inmóvil no se puede estar...). Kelvin entonces propuso que contemos la temperatura a partir de este *Cero Absoluto* y midamos con la misma unidad del grado centígrado. Notemos que Kelvin propuso que se usara el grado centígrado, y no el grado Farenheith, el usado en Gran Bretaña. Es que Kelvin aborrecía de las unidades Británicas, y era un gran propulsor del sistema "Francés" es decir el sistema métrico decimal que hoy es el oficial en Ciencia. La temperatura "absoluta", la escala propuesta por Kelvin, hoy se denota con una K mayúscula, en honor justamente a Kelvin y se habla de grado Kelvin cuando medimos la temperatura en grados centígrados por encima del cero absoluto. En esta nueva escala entonces, el agua hierve a 373 K y se congela a 273 K.

El desafío de llegar al cero absoluto se planteó entonces a partir de la extrapolación, bastante audaz, que había hecho Kelvin. Porque se estaba bastante lejos en la época de los -273 grados. Y tampoco había ninguna garantía de que no aparecieran otros efectos que modificaran el ritmo de reducción de volumen de los gases. Pero Kelvin tenía bastante buen instinto, o intuición, o tuvo suerte, y de hecho la idea es básicamente correcta. El movimiento térmico efectivamente casi se detiene aunque hay excepciones en algunos materiales, como veremos, pero esto Kelvin no podía

saberlo porque es un efecto descubierto mucho después. Además el volumen no se hace cero, pero disminuye drásticamente (esto ya lo sabía Kelvin, de sobra). En verdad los gases ideales no existen, y todo gas se vuelve líquido a temperatura suficientemente baja. Se sabía desde mucho antes, que algunos gases se licuaban y que su volumen se reducía al llegar al estado líquido. Lo típico es que un líquido ocupe unas 700 veces menos volumen que el gas correspondiente. O sea el volumen no se hace cero, pero es muchísimo menor.

Kelvin no solo hizo Termodinámica. Tuvo un gran interés por las aplicaciones prácticas de la Ciencia y trabajó en varios temas, mejorando las brújulas que se usaban en los barcos y en problemas de Electricidad. Una de sus contribuciones fue la de asesorar y solucionar problemas técnicos del primer cable submarino colocado en el Atlántico Norte, entre Inglaterra y Estados Unidos. Increíblemente, en 1866, cuando la gente se iluminaba todavía con velas, se desplazaba a caballo y usaba leña para cocinar, un empresario norteamericano Cyrus West Field creó una compañía para tender un cable telegráfico a través del Océano Atlántico. La compañía anglo norteamericana gastó fortunas y tuvo que hacer varios intentos, venciendo tormentas, adaptando barcos y construyendo los miles de kilómetros de cable necesarios. Kelvin se embarcó varias veces en las naves que tendían el cable y solucionó muchos de los problemas técnicos que fueron apareciendo, tanto de cálculo como de desarrollo de aparatos sensibles para detectar las débiles señales que llegaban. Por todo este trabajo, que sumado fue un *capolavoro* de física aplicada, Thomson fue ennoblecido por la Reina Victoria de Inglaterra. Como era su privilegio, eligió un nombre para su nuevo estado nobiliario, y por eso lo conocemos como Lord Kelvin, siendo que el Kelvin era un pequeño río que corría cerca de la Universidad de Glasgow. Este fue su premio por el interés que siempre tuvo por la aplicación de los resultados científicos. En su época, el telégrafo era la única manera de llevar un mensaje rápidamente, y tanto el ferrocarril como el telégrafo eran las tecnologías de punta de mediados del siglo XIX. Ya estaba pasando el tiempo del caballo, el barco de vela y las postas de caballos para trasmitir mensajes. Venían pisando fuerte los barcos de vapor, el ferrocarril y el telégrafo, todavía con hilos. Las señales de Radio, los aviones y el automóvil, recién verían la luz a fin del siglo XIX y principios del XX.

Pero volviendo a la Temperatura, fue también a finales del siglo XIX y principios de XX que se llegó a un acercamiento al Cero Absoluto de Temperatura que había predicho Kelvin. Hubo que desarrollar muchas técnicas, y conocer más sobre materiales, desentrañar las propiedades de los gases *reales* esos que están en la Naturaleza, y no de los llamados gases *ideales* que existen solamente en el reino Platónico de las ideas. De eso hablaremos en el próximo capítulo.

***

El ciclo de Carnot

La máquina ideal pensada por Carnot es un elemento indispensable en los textos de Termodinámica, aún hoy, casi doscientos años después de formulado el concepto por Carnot. Veamos un poco en que consiste el famoso ciclo.

*Carnot se inspiró en las máquinas existentes, es decir, la máquina de vapor, casi el único tipo que había en la época. Como la de vapor, la máquina ideal de Carnot tiene dos fuentes, una **caliente** (correspondiente a la caldera) y una **fría** (que es el agua que se agrega a la máquina de Newcomen para enfriar el vapor en su cilindro único, o el cilindro frío de la máquina de Watt.) Además, la máquina en sí, y su fluido de trabajo, siguen un **ciclo** repetido muchas veces, pero puede decirse que el fluído empieza en un estado, y vuelve al mismo estado luego del ciclo. El concepto de máquina cíclica simplifica el análisis, permitiendo al ambiente que cambie, recibiendo o dando calor y trabajo, pero la máquina sigue igual.*

*Carnot eligió no usar vapor como fluido para mover su máquina. Ya que estaba idealizando, usaría el **gas ideal**. Un gas ideal es el que cumple la llamada ley de los gases ideales, es decir que cumple*

exactamente las leyes de Boyle-Mariotte y Charles-Gay Lussac. Se puede resumir su comportamiento en la fórmula :

$$P.V = nRT \qquad \text{(ecuación 1)}$$

donde P es la presión, V el volumen y T la temperatura. R es una constante, la misma para todos los gases, y n es la cantidad de moles, es decir el peso del gas dividido su peso molecular. Casi todos los gases reales obedecen esta fórmula, a menos que estén muy cerca de la temperatura en que se vuelven líquidos. El vapor de agua justamente no cumple muy bien la condición de gas ideal, porque pasa de agua a vapor y viceversa todo el tiempo, en una máquina real. La temperatura se mide en grados Kelvin, anacrónicamente, ya que Carnot no tenía idea de este avance posterior. Estamos desarrollando las cosas como lo vemos actualmente, y no vamos a entrar en todas las diferencias, también vamos a usar el análisis basado en la entropía debido a Clausius como es usual en los textos actuales.

Por otro lado la máquina tiene un cilindro (para qué más...) y nos podemos imaginar que el fondo conduce el calor y se pone en contacto con fuentes de calor, una caliente a temperatura Ta (temperatura alta) y una fría a Tb (temperatura baja). Mientras está en contacto con las fuentes, el gas del cilindro mantiene constante su temperatura (Ta o Tb según el caso) lo que se suele llamar condiciones isotérmicas . También se puede aislar el fondo conductor de alguna forma mágica, y entonces el cilindro no intercambia calor con nada, y esto se suele llamar una condición adiabática para el gas que llena el cilindro. Bajo condiciones adiabáticas, la presión y el volumen se relacionan por:

$$P.V^{7/5} = cte. \qquad \text{(ecuación 2)}$$

tomemos esta fórmula como dato, sin deducirla, vale para un gas de moléculas diatómicas como es el aire.

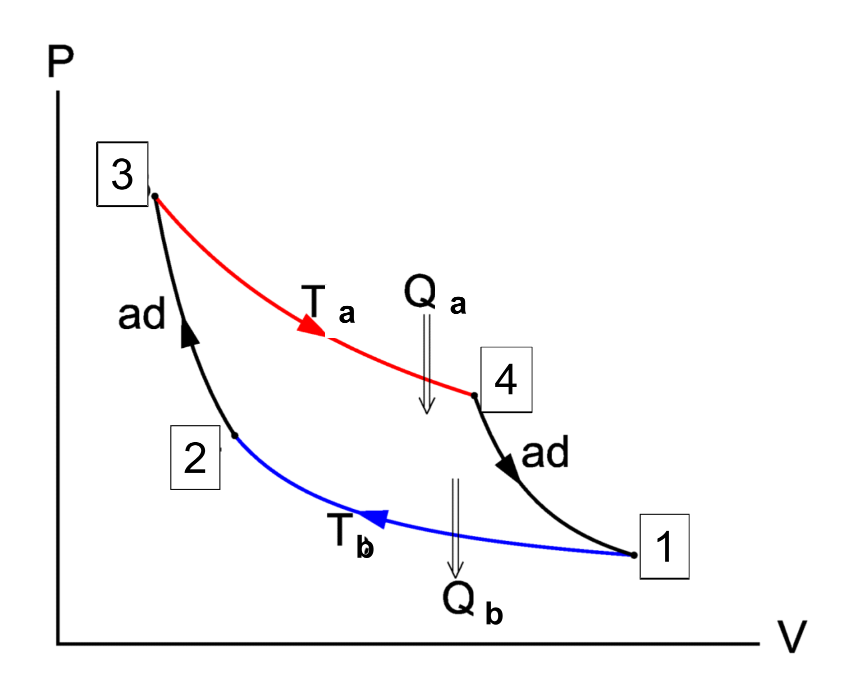


Figura 13 :Presión y temperatura del gas ideal a lo largo del Ciclo de Carnot

Vamos a referirnos a la Figura 13 para explicar los cambios producidos en el gas a lo largo del ciclo. Empezamos con el gas a una temperatura Tb y ocupando un volumen V_1 bastante grande, el punto 1 del gráfico. Ahora, comprimimos el gas aplicando una presión un poco mayor que la que

tenía, vamos aumentando la presión gradualmente y el volumen se achica. El gas está en contacto con la fuente fría, y por lo tanto se le aplica la ecuación 1 (o la ley de Boyle Mariotte) donde P.V permanece constante. La curva entre 1 y 2 refleja esa ecuación, que tiene forma hiperbólica (P=1/V). Pero al comprimir estamos haciendo trabajo sobre el gas y es propiedad del gas ideal que al comprimirlo se calienta. En este caso, por estar en contacto con la fuente fría a temperatura Tb, se cede calor a la fuente fría, digamos que el calor lo llamamos Qb. El calor fluye reversiblemente, porque mantenemos todo a la misma temperatura, o casi, dejando que el pistón se mueva suficientemente lento como para darle tiempo al calor generado a fluir. En un sistema todo a temperatura igual, es posible cambiar calor de un lado al otro reversiblemente, lo cual no ocurre si un punto es más caliente que otro. El postulado de Carnot era que lo único que puede pasar espontáneamente es que el calor vaya del punto caliente al frío.

Aumentando la presión llegamos al punto 2, y allí apartamos la fuente fría, reemplazándola por una pared impermeable al calor. Seguimos empujando el pistón y reduciendo aún más el volumen, pero ahora nada detiene el aumento de temperatura producido por nuestro trabajo mecánico. El sistema adiabático evoluciona por la ecuación 2: $P.V^{7/5}$ *= cte., lo cual es una curva un poco más empinada en el gráfico, y la temperatura aumenta. Detenemos el pistón cuando la temperatura es igual a Ta, en el punto 3 del gráfico. Ahora conectamos la fuente caliente a temperatura Ta.*

Hasta aquí lo único que hemos hecho es entregar trabajo a la máquina, y el gas se calentó en la última etapa. Pero ahora podemos recuperar la inversión. Dejamos de empujar el pistón, y ahora el gas se expande, con lo cual realiza trabajo, puede empujar el mecanismo que sea. Al expandirse, el gas se enfriaría, pero para eso está la fuente caliente, y todo se mantiene a Ta. Hay que dejar que fluya el calor sin levantar la temperatura, para que el calor se trasmita siempre a temperatura constante, en forma reversible como se hizo en la primera parte del ciclo. También el comportamiento sigue una ley de Boyle Mariotte, pero la temperatura es mayor, lo que implica que la hipérbola es distinta. El calor suministrado por la fuente es Qa. Así llegamos al punto 4, donde desconectamos la fuente térmica y volvemos a colocar nuestra pared adiabática.

A partir de allí seguimos dejando que el gas se expanda y entregue trabajo, pero al no tener fuente de calor, se va a enfriar, siguiendo la ecuación 2, más empinada la curva que en el tramo anterior. Todo está fríamente calculado para que llegue a la temperatura Tb, y se reencuentra la curva en el punto 1. En este punto el ciclo se cierra, el gas llegó a las condiciones de partida y todo puede volver a empezar.

Ahora interviene la definición de entropía debida a Clausius. Un sistema posee un único valor de entropía si está en las mismas condiciones de temperatura y presión, por ejemplo, y cualquier cambio de entropía puede calcularse si se usa un proceso ***reversible*** *para cambiar temperatura o presión. Por ejemplo, en el gráfico de arriba, entre el punto 1 y 2 han cambiado temperatura y presión y la entropía cambió. La expresión matemática que hay que usar es dividir el calor intercambiado, por la temperatura a la que se intercambió calor, teniendo el cuidado de expresar la temperatura en Kelvin. En el paso de 1 a 2, el cambio es isotérmico, a la temperatura más baja Tb, y si el calor intercambiado es Qb, el cambio de entropía es Qb/Tb (en este caso es más simple la cuenta porque Tb es constante y como a propósito hicimos el proceso reversible, el cambio de entropía del gas viene dado por Sb = Qb/Tb . En el tramo adiabático y reversible, el calor intercambiado es cero, y no cambia la entropía, o sea, tanto de 2 a 3, como de 4 a 1, no cambia la entropía. Entre 3 y 4 en cambio, la entropía cambia, y esta vez es Sa=Qa/Ta, análogo al caso anterior, porque otra vez el cambio es a temperatura constante y es reversible. Solo los valores numéricos son distintos. O sea que en el ciclo hay dos ramas(la 1-2 y la 3-4) donde cambia la entropía, y dos ramas donde no (la 2-3 y la 4-1). Pero como el ciclo es cerrado, la entropía debe*

volver al mismo valor, porque a la temperatura y presión del punto 1 la entropía queda definida unívocamente. Es decir que la suma de la entropía calculada alrededor del ciclo es cero, y por lo tanto $Sb + Sa = 0$, o sea $Qb/Tb+Qa/Ta =0$. Notar que el calor va en un sentido en una rama y en el opuesto en la otra, por eso despejando: (A) $Qa/Ta =-Qb/Tb$. También hicimos uso de que el cambio la entropía es cero en las ramas adiabáticas 2-3 y 4-1 porque adiabático implica $Q=0$ en esa parte del recorrido.

El trabajo realizado a lo largo del ciclo (W) es el balance del calor entregado a la fuente fría y el recibido de la fuente caliente, o sea que $W= Qa - Qb$. Reemplazando de la fórmula (A), $W= Qa-Qa.Tb//Ta = Qa(1-Tb/Ta)$. La eficiencia de la máquina puede ser definida como la cantidad de trabajo W dividido el calor absorbido de la fuente caliente Qa, o sea el calor suministrado a la caldera (en realidad una parte del calor del fuego se pierde calentando el aire, asi que el calor Qa que absorbería el gas ideal es menor que el suministrado por el combustible, pero seamos optimistas y tomemos el caso de una caldera ideal) . Haciendo el cociente

$W/Qa= Qa(1-Tb/Ta)/Qa= (1-Tb/Ta)= (Ta-Tb)/Ta$.

vemos que la eficiencia resulta proporcional a la diferencia de temperaturas, dividida la temperatura caliente. Esto si expresamos la temperatura en Kelvin, o sea a partir del cero absoluto.

***

La carrera del frío

Kelvin había formulado la hipótesis del cero absoluto, pero en la época en que lo propuso se estaba muy lejos de poder enfriar a esas temperaturas. Sin embargo, dada la larga vida de Kelvin, pudo ver en sus últimos años cómo otros científicos llegaron a pocos grados del cero de temperatura, aunque se vio que en la práctica el cero en sí mismo, era inalcanzable. No se trata de mejorar las técnicas, es la termodinámica misma la que dice que ése es un punto donde no se puede llegar.

A mediados del siglo XIX, la época en que se estaban clarificando las leyes del calor y la Termodinámica, era común hablar de dos tipos de gases, los `vapores´ y los `gases permanentes´. Era una distinción empírica, ya que substancias como el agua tenían su vapor y existían como líquido a temperatura ambiente. El vapor de agua es *el* vapor, y como ocurre varias veces dentro de este mismo texto la *máquina de vapor* se sobreentiende que es a vapor de agua. Pero hay otras substancias, como el llamado éter de petróleo, que pasan fácilmente de líquido a gas a temperaturas cercanas al ambiente.

La distinción entre vapores y gases permanentes estaba dada porque los vapores se volvían líquidos a suficiente presión y los gases permanentes no lo hacían. Un ejemplo cotidiano para nosotros son los llamados `gas natural´y `gas envasado´. En los encendedores descartables a gas, hay un recipiente de plástico trasparente y adentro se puede ver un líquido, también trasparente. Este líquido es *butano*, gas envasado que está bajo presión y vemos líquido. Pero cuando abrimos la válvula, sale el líquido y a la presión atmosférica se gasifica. Esto es muy cómodo para encenderlo con la chispa provista por la piedrita del encendedor. Pero si lo recogiéramos en un globo, tendríamos el gas y lo podríamos licuar si lo ponemos en un recipiente de presión adecuado. Por el contrario, una cocina a gas natural, utiliza gas a baja presión, en este caso *metano*, parecido al butano pero imposible de licuar bajo presión a temperatura ambiente. Por eso los autos a GNC, que usan metano, tienen un tanque a alta presión, pero lleno con gas presurizado, no con líquido. ¿Cuál es la diferencia entre el *metano* y el *butano*? Los dos son compuestos de carbono e hidrógeno, pero la molécula de metano tiene un solo carbono y cuatro hidrógenos, y la de butano tiene cuatro carbonos y 10 hidrógenos. Esto hace que la atracción entre molécula y la agitación térmica jueguen un rol diferente en cada uno.

No es difícil de entender cualitativamente la diferencia de comportamiento si recordamos la imagen atómica o molecular de la temperatura. A temperatura y presión ambiente, ambos materiales son gases. Esto quiere decir que la agitación térmica es más energética que la atracción entre moléculas. Entonces cada molécula vuela de un lado al otro, y si se acerca mucho a otra se siente atraída pero no lo suficiente como para pegotearse con la compañera. Al bajar temperatura, la agitación disminuye, y la atracción vence a la energía de movimiento. El gas se licua, pero en el metano la atracción mutua es más baja que en el butano, por lo tanto se hace líquido a temperatura más baja. Ahora si se aplica presión, ayudamos a que las moléculas se atraigan. Por un lado comprimimos el gas, las moléculas están más cerca unas de otras y esto aumenta la atracción, por otro favorecemos el choque entre molécula, hay más choques triples, y hay más atracción entre tres moléculas que entre dos. Lo que ocurre es que a temperatura ambiente, el butano se "pegotea" a una dada presión, pero la atracción del metano que es más débil, no alcanza para que se forme líquido. No importa cuanta presión queramos ponerle, en la práctica no podemos hacer la suficiente. Estamos limitados por los materiales disponibles, y por eso se usa el metano comprimido como gas y el butano, más fácil de licuar, lo podemos tener líquido en garrafas o recipientes presurizados.

En las frases anteriores hemos caído en una costumbre, común entre físicos y otros científicos. Este es el hábito de "personalizar" a la Naturaleza. Por supuesto que la molécula no "siente" nada, a la manera en que puede sentir una persona, ni se siente "atraída" de forma personal. Pero para no repetir constantemente "interaccionan" o "hay una fuerza atractiva", etc. a veces se les

atribuyen caracteres casi humanos a los sistemas físicos. Al fin y al cabo, los que trabajan todo el día estudiando materiales terminan conociéndolos mejor que a muchos primos lejanos. Aunque por favor, recordemos que en el fondo la Naturaleza es impersonal, y no debemos adjudicarle propósitos ulteriores parecidos a nuestras motivaciones humanas. De todos modos, esa curiosa costumbre de antropofizar cosas completamente inanimadas y carentes de motivaciones personales, aparece a menudo en las discusiones informales entre científicos.

Se conocía desde los Alquimistas que algunos gases se podían licuar con presión, y que la presión de licuefacción bajaba si el gas estaba más frío. ¿Ocurría lo mismo con todos los gases? No estaba claro si había diferencias cualitativas entre unos gases y otros, o si en el fondo simplemente eran todos iguales. La diferencia podía ser solamente cuantitativa, es decir que la temperatura de licuefacción existía para todos y no se licuaban porque no se había alcanzado una temperatura suficientemente fría.

El aire, el prototipo de gas, era claramente un gas permanente, hasta que se demostrara lo contrario. No había manera de licuarlo bajo presión. Entonces había que probar, bajando la temperatura. O usando ambas cosas, es decir alta presión y baja temperatura. Por esos azares del destino y la coincidencia científica el aire se licuó por primera vez en diciembre de 1877. Dos personas en dos ciudades distintas lograron lo mismo, aunque por métodos tan diferentes que estaba claro que nadie se copió de nadie. Rauol Pictet, de la ciudad Suiza francoparlante de Ginebra y Louis Paul Cailletet de la francesísima París lograron la hazaña.

Pictet era nacido en Ginebra, en 1846 o sea en los años en que se estableció la Termodinámica. Estudió en Ginebra, pero también en París en el prestigioso Politécnico y en el no menos destacado College de France. Con 23 años, construyó una máquina refrigeradora que producía 15 kilos de hielo por hora. En 1869 viajó a la inauguración del Canal de Suez, otra de las grandes obras civiles de la época, finalizada un año después que el tendido del cable telegráfico del Atlántico en el que intervino Kelvin. La empresa, financiada por Francia y construida por técnicos franceses tardó diez años en completarse y cambió el tráfico marítimo, permitiendo navegar de Europa a la India y Lejano Oriente sin dar toda la vuelta a África. Pictet estuvo en Egipto para la ceremonia de inauguración, que fue un gran evento, incluido el estreno mundial de la ópera *Aída* que había sido compuesta por Verdi expresamente para la ocasión. Pictet era en verdad simple acompañante de un ingeniero de mayor experiencia, pero decidió que en Egipto podía instalar máquinas de producir hielo. Volvió brevemente a Suiza y luego vivió en Egipto hasta 1875. Fue profesor en la Universidad del Cairo con 26 años y se encargó de modernizar la educación del país, pero decidió volver por causa del clima, tanto físico como organizativo. Egipto era parte del Imperio Otomano, y sujeto a los vaivenes complicados de la política del poder central por lo cual se hacía difícil mantener una actividad innovadora y vista con sospecha por las autoridades centrales del Imperio.

De vuelta en Ginebra Pictet fundó una escuela técnica y su interés por obtener cada vez menores temperaturas lo llevó a anunciar en 1877 la licuefacción del oxígeno, uno de los componentes del aire y ejemplo de `gas permanente´. Pictet envió un telegrama desde Ginebra a la Academia de Ciencias de París anunciando su descubrimiento. Quería dejar sentada su prioridad, pero casi simultáneamente, con días de diferencia, Cailletet en París, anunciaba prácticamente lo mismo. Es que ya a mediados del siglo XIX la ciencia se comunicaba de otra manera. Habían pasado los tiempos en que los Alquimistas mantenían secretos sus datos y la época de los aficionados ricos, que publicaban si querían, cuando querían. Ahora había revistas regulares donde publicar resultados y el prestigio profesional se medía por el reconocimiento de otros colegas, a base de los resultados originales comunicados a la comunidad científica. Para establecer quién había llegado primero contaba la fecha de publicación, por eso el apuro de Pictet. Con diferencias menores, este es el sistema que rige actualmente.

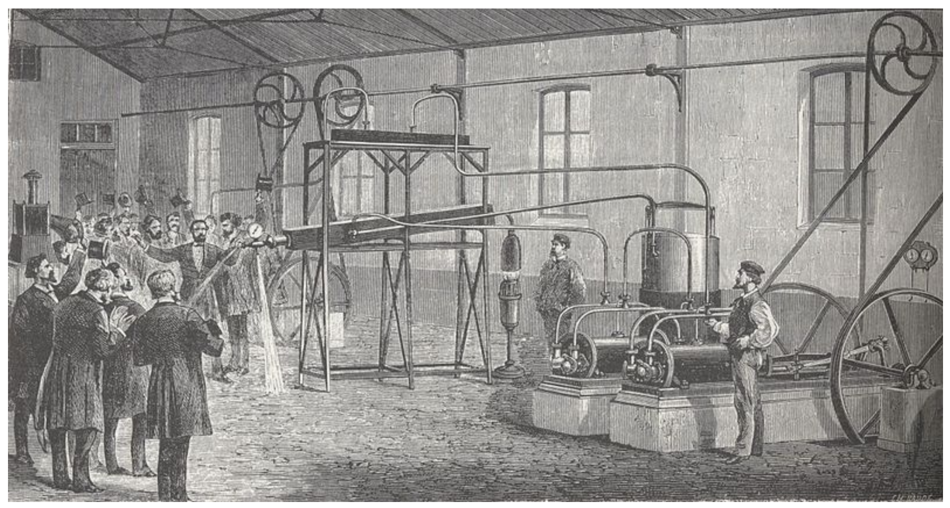


Figura 14

Fábrica de hielo de Pictet según un grabado de la época.

Días más, días menos, hubo alguna disputa respecto a la prioridad pero ninguna duda de que ambos habían llegado independientemente al mismo resultado. Pictet había usado un método de cascada, es decir había enfriado primero un material (ácido sulfuroso- $H_2 SO_3$) para luego enfriar otro (ácido carbónico-H_2CO_3). Con esta cascada llegaba a 140 grados centígrados bajo cero y luego presurizaba el gas hasta unas 320 atmósferas. Con esto conseguía licuarlo, ya estaba a temperatura suficientemente baja como para usar el mismo mecanismo que se usa en el butano de los encendedores. Cailletet, por su parte había llegado primero a 29 grados bajo cero usando etileno evaporado a baja presión. Con esta fuente fría había pre-enfriado un volumen de oxígeno a 200 atmósferas. El gas no llegaba a licuarse a esa presión, pero había un truco más, Cailletet liberaba bruscamente la presión, con lo cual el gas se enfría todavía más. El experimento se hacía dentro de un tubo de vidrio, y se veía que en la descompresión se formaban gotitas de líquido que duraban instantes. El pre-enfriado era imprescindible, como se sabía por el trabajo de Joule y Kelvin, en el llamado efecto Joule-Thomson (publicado antes de la promoción de William Thomson al título de Lord Kelvin). Estas sutilezas, de presión y temperaturas, efectos Joule-Thomson, cascadas, y otros detalles fueron importantes en toda la etapa siguiente de licuefacción de gases. Los explicamos aparte, para el lector que esté interesado en más profundidad técnica y puede ser salteado por el que no. Por ahora digamos que se puede licuar oxígeno de dos formas diferentes, y que así se abrió el camino para intentar licuar todos los gases conocidos.

Pictet se hizo famoso (y Cailletet también) obteniendo cátedras en Ginebra, pero no le fue tan bien como empresario. Se involucró en la industria del hielo pero tuvo muchos problemas financieros y disputas de patentes. Finalmente se retiró a París en 1913, y allí murió en 1929, a la edad de 83 años.

Louis Paul Cailletet, por su lado había llegado al problema de una manera diferente. Nacido en Francia, en la Borgoña en 1832, era unos años mayor que Pictet y su familia poseía una empresa de altos hornos y fábricas en la región. Estudió en París, en la Escuela de Minería, que daba una sólida formación técnica a sus alumnos. Luego viajó en compañía de su hermano para continuar formándose científicamente en otros centros Europeos. Sin embargo, los hermanos tuvieron que hacerse cago de la empresa familiar. Louis Paul hubiera preferido seguir su vocación científica, pero pudo desarrollar algo de su interés dedicándose a modernizar la fábrica y aplicando el método científico a estudiar algunos problemas prácticos de la fabricación de hierro y acero. Uno de los problemas era la aparición de burbujas de gas en las piezas fundidas. ¿De dónde venía ese gas? o más bien, ¿cómo se metía dentro del metal? Cailletet encontró que el hierro al rojo vivo era permeable a muchos gases, en particular al monóxido y dióxido de carbono que existían en el

horno, que funcionaba quemando carbón para fundir el hierro. La necesidad y la curiosidad lo llevaron a estudiar gases a altas presiones, y a las bajas temperaturas que utilizaba para recoger e identificar los gases producidos en los hornos. Así también estudió la ley de gases ideales en el oxígeno y el aire. Encontró que a muy alta presión y temperatura ambiente el aire empezaba a desviarse de la idealidad, realizando sus experimentos desde la Torre Eiffel, donde estableció un laboratorio. Fue invitado por el propio Eiffel, que quería mostrar la utilidad de su torre más allá de la Exposición Mundial para la que fue construida. Cailletet disponía en la torre de cientos de metros de altura, y columnas líquidas de gran altura proporcionan altas presiones. Viendo que a alta presión el aire ya no era un gas ideal y su comportamiento se parecía al de un vapor, Cailletet se puso a la tarea de licuarlo. Como dijimos partió de una baja temperatura relativamente modesta pero usó el efecto Joule-Thomson y tuvo éxito casi a la vez que Pictet. Cailletet fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de París por sus trabajos, y siguió estudiando las propiedades de los gases. En el laboratorio de la Torre Eiffel también estudió la caída de cuerpos, midiendo la resistencia del aire durante la caída, un trabajo que proveyó uno de los tantos datos que se usaron en la aeronáutica que vendría más tarde. Murió en París en 1913 habiendo contribuido, lo mismo que Pictet, a lanzar la carrera por licuar los restantes gases conocidos.

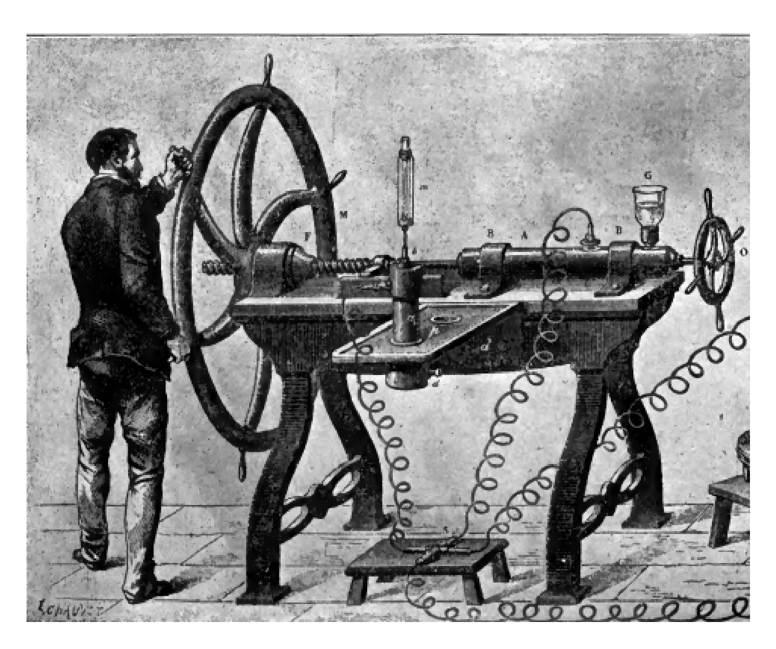


Figura 15

Primer aparato para licuar aire de Cailletet. La manivela es para comprimir el gas, el licuefactor propiamente dicho es el pequeño cilindro vertical en el centro del aparato.

Pero en cierta manera, ya había consenso en que finalmente todos los gases iban a poder ser licuados, lo único necesario era poder enfriar lo suficiente. Así el desafío parecía ser técnico, mas que científico. Una cuestión simple o compleja, pero cuyo resultado estaba cantado, si había una mínima atracción entre átomos y la temperatura bajaba lo suficiente, la atracción vencería a la agitación térmica y el gas terminaría licuándose, y también solidificándose, si bajamos todavía más. Faltaba todavía mucha investigación, porque para licuar un gas con éxito hay que conocer bastante detalladamente su comportamiento. Se puede inferir algo estudiando las desviaciones que tiene los gases reales respecto al gas ideal. A menudo esto se puede saber midiendo con cuidado las propiedades a alguna temperatura accesible y así saber aproximadamente a qué temperatura puede llegar a licuar. Esta estrategia resultó acertada, aunque para ponerla en práctica hizo falta perseverancia, ingenio y mediciones cuidadosas.

Así los gases conocidos fueron licuándose sucesivamente. Hasta uno desconocido en 1877,

el helio, finalmente sucumbió y fue transformado en líquido en 1909. Pero se encontraron otras cosas nuevas. Como suele suceder cuando se exploran dominios desconocidos, aparecen fenómenos novedosos, y en la física del frío aparecieron dos estados de la materia nuevos, exclusivos del mundo de los pocos grados Kelvin, llamados superconductividad y superfluidez. Pero esto lo veremos en los próximos capítulos.

***

Método de cascada, calores latentes y otros etcéteras

Los gases se transforman en líquidos y los líquidos en sólidos, pero también pueden coexistir gas y líquido o gas y sólido si son adecuadas las condiciones de presión y temperatura. Es familiar el caso de unos cubitos de hielo flotando en el agua de un vaso. O el de las burbujas de vapor de agua desprendiéndose del líquido en una pava que hierve. Se dice que hay dos <u>*fases*</u> *coexistiendo, a cada estado de la materia se le suele llamar fase, líquida, sólida o gaseosa según el caso. Veamos en detalle el caso del agua que hierve, o antes de hervir, del agua en coexistencia con su vapor. Pensemos en un recipiente como el de la figura:*

Este representa esquemáticamente un recipiente con líquido que puede evaporarse, mantenido a una temperatura P. La agitación térmica correspondiente a la temperatura T es la que fija el promedio de velocidades (es decir energías cinéticas) que tienen las moléculas del líquido. Pero eso es sólo el promedio, no todas las moléculas tienen la misma energía, algunas van más rápido y otras mas lento, de pronto dos partículas le pueden comunicar energía grande a una tercera en una colisión triple, y hay lo que se llaman fluctuaciones, es decir que en algunos lugares hay más o menos agitación que en otros. Los choques son al azar, lo que llamamos temperatura es la energía promedio de velocidades al azar que cambian constantemente. Por eso, algunas moléculas cercanas a la superficie, de golpe tienen tanta energía que se escapan. Mientras tienen suficiente energía pueden formar un vapor, separado del líquido. Sin embargo, después de otros choques, algunas vuelven al líquido y si perdieron energía suficiente en los choques del camino, quedan atrapadas otra vez y forman parte del líquido.

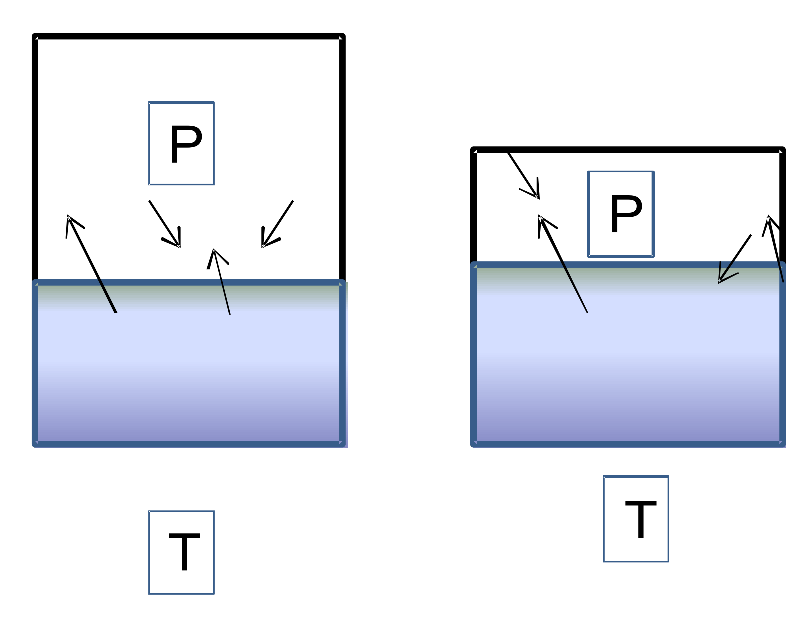


Figura 16: Esquema de un líquido y gas en equilibrio, a presión P y temperatura T, para volúmenes diferentes. Se esquematiza con flechas las moléculas que pasan

a un lado y otro de la superficie líquido - gas.

Hay un equilibrio dinámico, con moléculas entrando y saliendo todo el tiempo. Este ida y vuelta hace que exista una parte gaseosa, y va a aparecer una presión dentro de ese gas, por la energía cinética de las moléculas `escapadas´. Al aumentar temperatura, son más las moléculas que escapan, y como su energía promedio es mayor, también tienen menor probabilidad de volver a ser atrapadas por el líquido. Al mismo tiempo, más energía cinética implica mayor presión, y el gas se presuriza más al subir temperatura.

Por otro lado, como indica el esquema, podríamos ahora achicar el recipiente que contiene la parte gaseosa, como a la derecha de la figura. Al achicar, las moléculas de gas se aceleran, y aumentaría la presión, pero está la parte en fase líquida, que puede absorber las moléculas sobrantes. En promedio habría un calentamiento s el sistema fuera aislado. Pero si mantenemos la temperatura constante, al final esa energía extra sale en forma de calor al regulador de temperatura y volvemos a la presión original. Vemos entonces que la presión se autorregula independientemente del volumen. Esto es consecuencia de la coexistencia de dos fases, líquido y vapor. Es diferente del caso de una sola fase, gas por ejemplo, regulada por la ley de gases ideales y donde presión, temperatura y volumen siguen la ley P.V=nRT.

En los sistemas de coexistencia líquido-gas fijar una temperatura automáticamente fija la presión, y a esta se la llama la presión de vapor a la temperatura en cuestión. En cada líquido es diferente porque a atracción entre moléculas es propiedad del material. En el caso del gas ideal, en cambio básicamente domina la temperatura y todos los gases son iguales, podemos despreciar u olvidarnos de la atracción mutua. Eso implica que un gas real va a ser más `ideal´ cuanto más caliente esté, o cuando más lejos de su temperatura de condensación se encuentre. El oxígeno y el nitrógeno licuan a unos 200 grados bajo cero, por eso en los experimentos de Boyle, Mariotte, Charles y Gay-Lussac hechos alrededor de 20 C, básicamente son ideales.

Para escapar del líquido y pasar al estado gaseoso una molécula debe vencer la atracción de las otras, y en el vapor va a estar `mas lenta´ que cuando salió. Pero se lleva energía cinética, que antes estaba en el líquido, y la trasformación de líquido en gas implica un cambio de energía del líquido. Esta energía suele ser bautizada como `calor latente´de la trasformación, o `cambio de entalpía´. Es una propiedad que se puede usar ventajosamente para enfriar un líquido, o para mantener una temperatura. Un ejemplo de todos los días lo vemos al poner agua a hervir. Al ponerla al fuego va subiendo su temperatura por el calor suministrado por la hornalla. Si pusiéramos un termómetro veríamos que la temperatura sube, pero al llegar a los 100 C el calentamiento se detiene ¿qué pasó?. No es que el fuego ya no calienta, lo que pasa es que el agua empezó a hervir, su presión de vapor se hizo igual a la atmosférica y vemos burbujas. Gran cantidad de agua se va trasformando en vapor. Como normalmente de escapa el vapor afuera, al ambiente, la energía llevada por las moléculas vaporizadas no vuelve al líquido y la energía del gas evapora más y más moléculas pero no puede levantar la temperatura. Podemos ver que subiendo o bajando el fuego producimos más o menos burbujas de evaporación, pero si ponemos un termómetro la temperatura sigue en 100 C. Es decir, la energía del fuego se va en evaporar el líquido, en darle `calor latente´ y no en subir la temperatura. Mientras dura el agua, la temperatura no sube, y se puede usar el fenómeno. El `baño María´ es usado por los cocineros, poniendo un recipiente que hierve todo el tiempo dentro de un horno, por ejemplo. Así se puede calentar suavemente una preparación que no soporte ser sobre calentada. Parece que este procedimiento es un invento Alquimista, atribuido a una legendaria mujer medieval Alquimista, llamada "María la Judía". Otra persona a recordar cuando hagamos una receta que pida usar el `baño María´.

El sistema agua y vapor de la olla es abierto, en el sentido de que dejamos escapar el

vapor a un ambiente muy grande, por eso no llegamos a un equilibrio con la presión de vapor como en la caja cerrada que dibujamos y describimos antes. Si ponemos una tapa, el vapor escapa solamente por las rendijas y parte del calor se re-atrapa, por eso es más eficiente tapar la olla. Y si la tapa es hermética tenemos una olla a presión, y la temperatura alcanzada es más grande. Esto se debe a que en realidad el punto de ebullición depende de la presión externa. Vimos que hay una presión de vapor que es función de la temperatura. El punto de ebullición es aquel en que la presión de vapor se hace igual a la atmosférica. El agua hierve a cien grados a la presión normal al nivel del mar. Con la altura disminuye la presión y los andinistas saben que hervir fideos en altura leva más tiempo, porque allí el agua hirviendo está más fría. En una olla a presión hacemos lo inverso, la tapa evita que se vaya vapor y sube a presión, hasta que se levanta la tapita de la válvula. Si no hubiera válvula podría reventar la olla, pero la válvula no es más que una tapa pesada que se levanta y deja salir vapor cuando la presión es suficiente como para levantar el peso. Con este ingenioso mecanismo la comida está lista antes, porque se cocinó a mayor temperatura.

Podemos usar el calor latente para enfriar también. Para eso hay que tomar un recipiente aislado lo más posible del ambiente, es decir adiabático. Lo llenamos parcialmente con líquido a alguna temperatura, y entonces el recipiente también se llena con gas a la presión de vapor a esa temperatura. Luego con una bomba de vacío bombeamos el gas, disminuyendo su presión. Podemos pensar que la bomba se va llevando las moléculas de gas que se escapan, de manera que no pueden volver al líquido. Pero estas moléculas son las más energéticas, las que están por encima del promedio en energía. Por eso, la energía promedio del líquido disminuye, y si está en un recipiente adiabático no puede recibir energía exterior y por lo tanto la temperatura promedio disminuye. Así se puede reducir la temperatura bastante, hasta incluso se puede solidificar el líquido cuando llega a la temperatura de solidificación. Otra manera de interpretar el mismo fenómeno es pensar que con la bomba disminuimos la presión de vapor del gas, y el líquido se equilibra con ese gas, a una temperatura menor, que corresponde a la nueva presión de vapor forzada por la bomba.

La relación entre temperatura y presión está determinada por una ley, la ley de Clausius-Clapeyron que mencionamos en el texto, y relaciona presión, temperatura y etalpía de la trasformación. Pero no vamos a deducir ni expresar la fórmula aquí, el lector mas interesado deberá buscarlo en los textos estandard de Termodinámica.

A menudo se utiliza una `cascada´ de varios gases licuados para llegar a temperaturas menores, usando el truco de licuarlos a una presión relativamente alta y bombeando el líquido para bajar la temperatura. Así un gas puede enfriar a otro, hasta licuarlo, se bombea el nuevo líquido para que este licue un tercero, etc. Este fue el método que usó Cailletet para licuar aire por primera vez. Para que la cosa resulte, hay que encontrar los gases adecuados, y en esto somos dependientes del capricho de la Naturaleza que determina a su manera cuáles compuestos químicos son posibles y cuales no. Tampoco podemos diseñar materiales con los puntos de fusión que queremos. Pero se pueden explorar compuestos viendo cuales se forman y buscar por similitud con compuestos conocidos, reemplazando si se puede un átomo por otro en la fórmula química. Por suerte, y gracias al ingenio de los químicos se han encontrado maneras de ir bajando la temperatura y de fabricar heladeras cada vez más eficientes.

***

Movimiento molecular, tamaño atómico y el Inspector de Patentes.

La idea de los átomos estaba bien arraigada entre físicos y químicos hacia el final del siglo XIX, pero algunos se negaban a aceptarla del todo. Un bastión de resistencia se encontraba en la Universidad de Viena, la capital del extenso Imperio Austro-Húngaro de la época. Lo curioso era que en la misma Universidad existía a la vez uno de los mayores propulsores de la realidad atómica, y una de las personas que ayudó a fundar lo que se conoce como Mecánica Estadística. Esta rama de la física utiliza la idea de movimiento atómico y molecular para entender mejor los nexos que existen entre la mecánica y la termodinámica.

Los incrédulos estaban liderados por Ernst Mach de Viena y Wilhelm Ostwald de la Universidad de Leipzig, un físico y un químico, ambos muy respetados y que realizaron contribuciones importantes en sus campos. En el otro bando estaba Ludwig Boltzmann Profesor en Viena como Mach. Tanto Ostwald como Mach aceptaban la utilidad de la imagen atómica como una generalización útil. Para la época ya se conocía la mayoría de los elementos químicos, y se usaba con mucho provecho la clasificación periódica de Mendeleev, que había encontrado que las propiedades químicas de los átomos se podían ordenar sistemáticamente. Pero la oposición de Mach y Ostwald era más filosófica y estaba basada en que no querían aceptar como válidas cosas que no se podían medir directa o indirectamente.

"Cuando puedes medir las cosas sobre las que hablas y expresarlas en números, entonces sabes algo sobre ellas." decía Kelvin, y tanto Mach como Ostwald tomaban esta definición muy en serio. Para ellos, no tenía sentido hablar o dar por reales cosas que no se podían medir. Los átomos parecían estar firmemente anclados en la categoría de los etéreos entes imposibles de medir. No se pueden ver los átomos. Son demasiado chicos como para el mejor microscopio conocido entonces y aún hoy es debatible si vemos imágenes atómicas. Algunos microscopios actuales permiten ver con lo que se llama `resolución atómica´ pero estas son imágenes obtenidas en condiciones bastante particulares. Permiten medir cosas sobre los átomos pero en la época de principios del siglo XX y finales del XIX no era posible obtener datos del tamaño atómico, aunque se sabía que tenía que ser muy chico e incluso mediciones crudas daban una idea del orden de magnitud de este tamaño. Pero había un grupo pequeño de científicos serios que no estaban convencidos, para ellos las regularidades observadas al combinar dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno para obtener uno de agua era una regla útil nada más y lo demás era especulación filosófica, no ciencia. O sea que su credo era "medir para creer" o "si no lo puedo medir, no existe". Un poco extremo, pero en el fondo una tendencia útil en ciencia. Se puede especular, pero lo que se mide es lo que se acepta por todos. Las especulaciones tienen su valor y pueden ser aceptadas por tiempos largos o cortos, hasta que son confirmadas o rechazadas experimentalmente.

Boltzmann, acompañado por la mayoría de los científicos fuera del círculo de Mach,creía por el contrario en los átomos, y tomó otro camino, más teórico, para poner a prueba el concepto. Lo que hizo fue llevar a cabo cálculos que usaban los átomos como punto de partida y aplicaban todo lo que se sabía sobre las leyes de la mecánica (que era mucho) para calcular propiedades de gases y otros materiales. Es decir, Boltzmann podía suponer que los átomos de un gas ideal eran esferitas duras que chocaban entre sí con la energía suministrada por la temperatura y calcular la presión que ejercían debido a los múltiples choques con la pared del recipiente. Así podía deducir las leyes de los gases ideales y comparar sus cálculos con las mediciones reales. Si su modelo era bueno y no erraba los cálculos, se podía decir mucho sobre las hipótesis usadas y hasta se podían sacar números detallados para comparar con los experimentos. Era una forma de acorralar al átomo teóricamente. No se calculaban las propiedades del movimiento de cada átomo sino los promedios, por eso la disciplina fue llamada "mecánica estadística" y Boltzmann es considerado uno de sus padres y tal vez el pionero más importante, junto con James Clerk Maxwell.

Sin embargo los cálculos de Boltzmann, a pesar de la genialidad con que fueron resueltos, no conseguían convencer a Ostwald. Hizo falta la intervención de un joven desconocido para convertir a los más recalcitrantes y finalmente hasta Ostwald reconoció públicamente que sus objeciones habían sido respondidas por teoría y experimento.

La persona en cuestión es nuestro empleado de Patentes favorito, Inspector de Tercera Clase en la oficina de Bern, Suiza. Un joven llamado Albert Einstein. Había nacido en la ciudad alemana de Ulm pero creció y pasó la adolescencia en Munich. Su formación como físico había sido buena, en el prestigioso ETH, la Escuela Politécnica de Zurich, Suiza. Sin embargo toda su vida Einstein tuvo problemas para dedicarse a problemas de física por simple obligación. Si un tema le interesaba era capaz de perseguirlo con dedicación, perseverancia y eficacia notable pero las materias obligatorias en el ETH no lo motivaban y sus notas, sin ser malas, eran peores que las de sus pocos compañeros de camada. En 1900 cuando se recibió Einstein, eran menos de una decena de egresados en física, pero los puestos en investigación eran más escasos todavía, tal vez uno o dos al año con suerte. Así que la salida era la docencia, y Einstein trabajó en eso un par de años, hasta que a través de un compañero de estudios consiguió un puesto en la oficina de patentes de Berna, como Inspector de Tercera clase. Allí determinaba si un pedido de patente era técnicamente sano, y se ve que podía pensar en temas de física, que era su verdadera pasión, cuando tenía algún momento libre.

Tanto y tan bien pensaba Einstein en sus ratos libres que en 1905, a los 26 años, este joven desconocido para sus colegas publicó cuatro trabajos breves pero sumamente importantes. Dos de ellos trataban sobre la Relatividad y lanzaron este tema al mundo. Otro trataba sobre la absorción y emisión de la luz, es conocido como el del "efecto fotoeléctrico" y este es el trabajo citado por el comité Nobel cuando Einstein recibió el Premio, en 1920. Pero aquí nos interesa el cuarto trabajo, el menos revolucionario.

La más convencional de las publicaciones de Einstein en ese año milagroso, proponía una forma ingeniosa de medir el tamaño de los átomos. No es de ninguna manera un trabajo revolucionario, pero es original, el resultado era importante, y sirvió para establecer entre sus colegas de la época, las credenciales de Einstein como un físico a tener en cuenta.

El punto de partida fue una observación de un botánico inglés, llamado Robert Brown que en 1827 había observado polen en su microscopio. El polen estaba disperso en agua, y Brown vio con asombro que las partículas se movían constantemente, como animadas de vida propia. Pensó que lo que movía las partículas era la fuerza vital, pero se fue descubriendo que partículas de hollín, sin vida, y suficientemente chicas se movían igual que las de polen. Lo que hizo Einstein fue darse cuenta que se podía adivinar el movimiento de los átomos mirando partículas mucho mayores, como las del movimiento Browniano. Supuso que este movimiento era producido al ser golpeado el polen por el movimiento incesante de los átomos.

El razonamiento, sin usar matemáticas, es algo así: La temperatura, como forma de energía, hace que los átomos se muevan, incesantemente, de aquí para allá. Es imposible ver los átomos, porque son demasiado chicos, pero usemos una analogía. Imaginemos que un grupo de nadadores adopta la curiosa costumbre de empujar barcos de un lado para el otro, pero nunca se ponen de acuerdo de cuánto empujar, ni cuando. Si empujan un barco de muchas toneladas, se va a mover muy, muy poquito. No sólo porque es pesado, sino que la falta de acuerdo entre los nadadores hace que casi la mitad empuje en una dirección y casi la mitad en la otra. Sin embargo, si empujan un bote liviano, como un gomón por ejemplo, este se moverá al azar un poco para cualquier lado. Primero porque al ser más liviano, se mueve más fácilmente, y segundo porque al haber menos empujadores es más probable que los que empujan para un lado, no se compensen exactamente con los que empujan hacia el otro. Aunque los nadadores fueran invisibles, podríamos ver el movimiento del barco. Algo parecido pasa con los átomos de un líquido, que serían nuestros nadadores chiflados, y con un grano de polen, que serían el barco. Einstein pudo calcular usando

mecánica estadística que un grano de polen (o de cualquier otra partícula) de una milésima de milímetro, se podría mover algunas milésimas de milímetro también, en algunos minutos. Y una milésima de milímetro se puede ver en un buen microscopio. Einstein, usando física clásica y los métodos de Boltzmann, dio una fórmula que se podía comprobar en un experimento y sacar valores más precisos que los que se conocían para el tamaño atómico. Los números previos menos precisos le sirvieron para hacer la primera estimación, que indicaba que la medición se podía realizar con la tecnología disponible. Una vez demostrado que el experimento era factible, aunque difícil, otros físicos pusieron manos a la obra y observaron el movimiento Browniano, usándolo para medir el tamaño del átomo. Esto terminó de convencer a los más recalcitrantes de la realidad de tal objeto. De ahí la importancia del artículo de Einstein. Un trabajo así hubiera hecho famoso a cualquiera, sólo que el autor se hizo más famoso por sus otras publicaciones, las más revolucionarias.

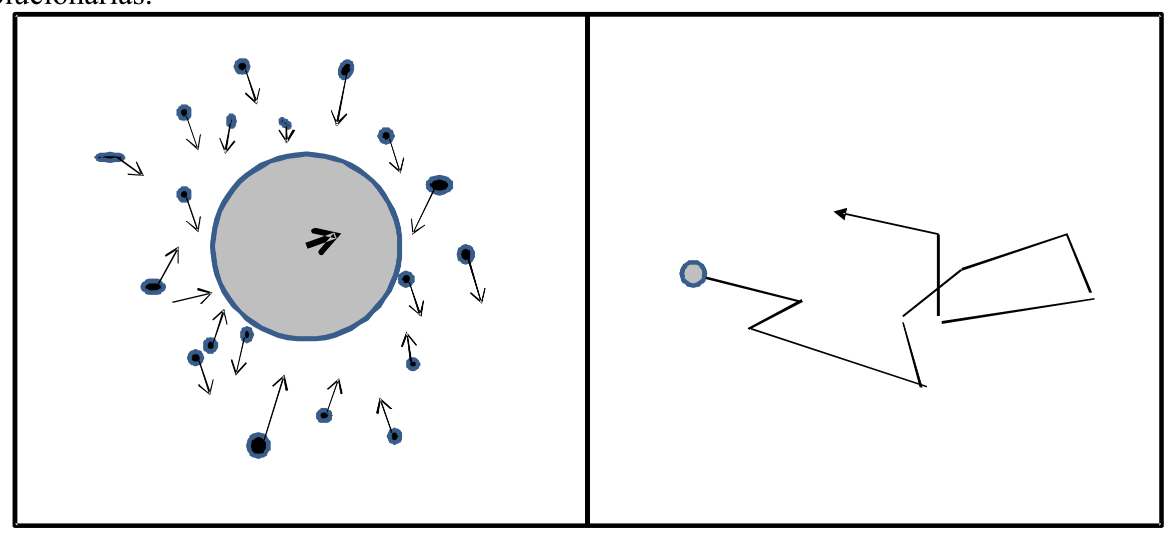


Figura 18

Esquema del movimiento Browniano. A la izquierda, la partícula `grande´ de cerca de un micrón (milésima de milimetro) y los átomos o moléculas del líquido de cerca de una millonésima de milímetro (decimos de nanómetro) que golpean al azar. Las velocidades se representan por flechas. A la derecha se representa una trayectoria posible. La escala de estos esquemas no es realista, no tomar el dibujo más que como guía para visualizar el problema.

Para cuando se realizaron los experimentos propuestos por Einstein, Mach había muerto, y Boltzmann, que sufría profundas crisis de depresión, se había suicidado. Pero Ostwald conoció los resultados y quedó convencido de que por fin se tenía una buena estimación del tamaño del átomo y se podía ver, aunque indirectamente, el efecto del movimiento atómico o molecular sobre cuerpos chicos, pero observables. Ostwald tuvo la lucidez de ver que se había equivocado y el coraje de reconocer públicamente que había cambiado de idea. La realidad del átomo y el movimiento molecular entonces dejó de ponerse en duda.

Einstein siguió trabajando en cuestiones de física estadística y comportamiento atómico, aunque su motivación era entender más sobre los cuantos de energía postulados originalmente por Planck, más que el cálculo estadístico en sí. Las contribuciones de Einstein a la mecánica cuántica son sumamente importantes, y todas se basan en razonamientos estadísticos. En verdad Einstein fue un brillante cultor de la mecánica estadística, aunque prácticamente la aplicó solo en problemas que permitían dilucidar algún aspecto de la misteriosa mecánica cuántica. Su primer trabajo en el tema hecho el año de 1905 fue el del `efecto fotoeléctrico´ donde lo que hizo fue explorar las consecuencias de un trabajo previo, publicado por Max Planck en 1900. Planck había introducido una nueva forma de calcular propiedades de la radiación, introduciendo un truco de cálculo, que era el de considerar que la radiación se absorbía y emitía en `paquetes´ o *cuantos* de energía y no de

forma continua. Con su truco Planck pudo calcular la forma en que emitía y absorbía la radiación un cuerpo caliente, un resultado importante que le iba a dar el Premio Nobel en 1918. Pero Einstein fue más lejos. En su trabajo de 1905 exploraba las consecuencias de tomar el truco de cálculo de Planck mucho más en serio, literalmente, como propiedad de la radiación. Uno de los lugares en que verificar la hipótesis de Einstein era en el llamado efecto fotoeléctrico, y un físico norteamericano, Robert A. Millikan encontró en 1917 total acuerdo entre sus experimentos y lo predicho por Einstein. Esta confirmación inesperada de la hipótesis de Einstein fue lo que llevó al comité Nobel a otorgarle el premio.

Pero antes de eso, en 1906, Einstein seguía pensando nuevas formas de poner a prueba si su idea era correcta. Por eso calculó el Calor Específico de un sólido, usando la cuantización encontrada por Planck. Einstein usó un modelo muy burdo para su sólido, y no esperaba tener muy buen acuerdo con lo medido, pero a grandes rasgos la cosa prometía. Comparando sus cálculos con el calor específico medido en el diamante, obtenía un acuerdo muy razonable, y lo más importante, describía adecuadamente el comportamiento general, es decir, se veía que tanto en su cálculo como las mediciones el calor específico disminuía al bajar temperatura. Esto no pasaba en un cálculo más clásico, y una vez más la intuición física de Einstein volvía a mostrarse de manera asombrosa.
Por esas vueltas de la vida, este resultado del calor específico, ayudó enormemente a que despegara por fin la carrera científica de Einstein. Recordemos lo que significa el Calor Específico. Es la cantidad de calor necesaria para levantar la temperatura de un gramo de material en un grado centígrado. Los materiales son diferentes, por ejemplo el agua tiene un calor específico de una caloría por gramo y el diamante 0.12 calorías por gramo. El cálculo de Einstein mostraba que el calor específico del diamante bajaba mucho al bajar temperatura, algo que era consecuencia de la hipótesis de Planck.

El resultado le vino como anillo al dedo a Walter Nernst, ya que encajaba perfectamente con una de sus hipótesis favoritas. Walther Nernst era toda una potencia dentro del sistema Universitario alemán. Persona multifacética, Profesor en la Universidad de Goettingen, había trabajado en múltiples ramas de la físico-química. Con gran interés por las aplicaciones prácticas de la ciencia (como Kelvin) había desarrollado una lámpara eléctrica incandescente, que luego fue suplantada por el modelo inventado por Edison (a su vez en vías de ser reemplazado por LED´s y otros sistemas). Tenía un gran prestigio, y buenas conexiones y poder dentro del sistema alemán, donde los *Herr Professors* manejaban sus cátedras sin interferencia de nadie, aunque el talento y el reconocimiento científico eran el único camino para llegar allí. La carrera de Nernst fue coronada en 1920 con el Premio Nobel, por sus contribuciones en termo química.

Walther Nenrst tenía especial debilidad por un resultado termodinámico, derivado por él, y que llamó "un nuevo teorema sobre el calor". Una de las consecuencias del teorema es que a muy bajas temperaturas, todos los calores específicos tienden a cero. Por eso, Nernst se interesó enseguida por el resultado de Einstein. Es que además, si se aplican los métodos de mecánica estadística sin la hipótesis de Planck, el calor específico de un sólido como el diamante debería ser independiente de temperatura, en contra de lo medido.

De Goettingen a Berna se podía viajar en tren, y Nernst aprovechó uno de sus viajes para conocer al hombre que había publicado el trabajo. Quedó encantado con la personalidad del joven, modesto pero hábil expositor y defensor de sus ideas físicas. Einstein a su vez debe haberse sentido halagado y contento por esta visita, un halago al que todavía no estaba acostumbrado. Reconocimiento temprano que luego se iba a hacer mucho más amplio, primero entre sus colegas y luego entre gente del mundo entero.

Nernst fue uno de los encargados de organizar el primer Congreso Solvay, una reunión de científicos congregados por Ernest Solvay para discutir asuntos candentes de la Física. Solvay se había hecho rico al desarrollar un proceso industrial para fabricar carbonato de sodio y quiso devolver a la Ciencia parte de lo que había ganado con ella. Decidió organizar estos congresos, en Bruselas, y se convirtieron en un foro tan influyente que la Revolución Cuántica fue gestada y

consensuada gracias a estas reuniones. La primera, en 1911 fue organizada por Max Planck y Walter Nernst y allí fue invitado el joven Einstein. Se empezaron a discutir resultados de Planck, Einstein y muchos otros, incluídos temas de Radiactividad, con la presencia de Madame Curie. Ya para entonces Einstein había obtenido puestos Universitarios, y en Bruselas, codeándose con lo mejor de la Física del momento, forjó amistades con gente como Planck por el que Einstein sentía verdadera admiración.

Pero las discusiones sobre mecánica cuántica escapan un poco al tema de este libro. Lo que sí tiene que ver es que a partir del trabajo de Nernst, Einstein y luego otros, había un nuevo motivo para explorar el mundo de las bajas temperaturas, cerca del cero absoluto que había postulado Kelvin. Lo que motivaba a los que buscaban temperaturas cada vez más bajas eran muchas cosas, ahora había una más. Por un lado era interesante explorar territorio nuevo, por otro saber si todos los gases conocidos se podían licuar, por otro, poner a prueba las predicciones de Einstein y el teorema de Nernst y por supuesto el puro afán deportivo de llegar donde nadie antes, y el prestigio deparado por la primicia.

Los montañistas tenían una respuesta cuando les preguntaban por que se esforzaban tanto por llegar a la cima. "Porque está allí" era la respuesta y lo mismo valía para el cero de temperatura. Ahora bien, lo que implicaba el "Teorema sobre el Calor" de Nernst era la imposibilidad justamente de llegar al cero absoluto. La meta está vedada, pero justamente por eso, se puede intentar llegar más cerca del cero que el explorador anterior, luego más cerca todavía y así. Las razones de la prohibición son el teorema de Nernst y que vivimos en un mundo con temperatura mayor que cero. El calor fluye espontáneamente de lo caliente a lo frío, y esto vale hasta el cero absoluto. Entonces, necesitamos una máquina y hacer trabajo para llevar calor de nuestro equipo experimental hacia afuera, nos lo dice el segundo principio. También necesitamos aislar nuestro punto frío, para que no vuelva a entrar el calor que sacamos pero no es posible reducir a cero toda entrada de calor. De manera que cuando nos acercamos al cero absoluto, una pequeña entrada de energía está siempre presente, pero el calor específico se achicó, prácticamente a cero por el teorema de Nernst. Esto significa que ante una entrada mínima de calor la temperatura va a crecer mucho. Recordemos que el calor específico es la cantidad de energía que levanta la temperatura un grado, si cero energía levanta un grado, estamos en problemas. Cerca del cero, el calor específico todavía tiene un valor pequeño pero no cero, con lo cual aguzando el ingenio para sacar calor con la máquina y aislando bien el punto frío se puede bajar bastante. El récord actual está en algunos millonésimos de grado por encima del cero absoluto. El teorema de Nernst fue verificado experimentalmente en forma exhaustiva y por eso se lo ha denominado el Tercer Principio de la Termodinámica. Por ahora no hay otros.

La carrera de la licuefacción: Francia, Polonia, Inglaterra Holanda.

La carrera por licuar gases, iniciada por Pictet y Cailletet se extendió a otros países Europeos, incluida Polonia. Un lugar bastante sorprendente para hacer Física de punta, ya que en la época el país estaba sojuzgado por el Zar de Rusia. El Zar no solo aborrecía de los principios de la Revolución Francesa, sino que prefería que sus súbditos polacos no fueran demasiado instruidos en nada, ciencia incluida. En esta situación política inició sus estudios Zygmunt Florenty Wróblewski, nacido en 1845 en lo que hoy es Bielorrusia. Fue a estudiar a Kiev, pero partió a Polonia para participar de una rebelión contra el Zar, en 1864. La revolución fracasó, y a los 18 años Wróblewski se encontró desterrado en Siberia. Estuvo cuatro años, y lo liberaron por influencias familiares, pero tuvo un par de años más de exilio interno en Rusia. En este forzoso aislamiento construyó algunas teorías físicas, lamentablemente equivocadas. En Siberia su vista se deterioró enormemente, pero pudo viajar y ser operado en Berlin.

Aquí podría haber terminado todo en tragedia, un pobre Polaco ciego y con teorías delirantes en el duro Reino Prusiano. Pero la tragedia no se produjo y Wróblewskiy recuperó bastante la vista y presentó sus teorías al gran Helmholz, el mismo de la Conservación de Energía y el Primer Principio. Helmholz parece haber sido un buen juez de las personas y su potencial como científicos, ya que vio algo en este joven extranjero. Sin quedar convencido de las ideas de Wróblewski le sugirió comprobarlas experimentalmente. Fue así que el polaco empezó a trabajar en varios laboratorios alemanes y finalmente pasó una temporada con Cailletet, en la Ecole Normale Superieure. Allí se le despertó la curiosidad y la ambición por la licuefacción de los gases, además de aprender los procedimientos de punta que usaba Cailletet. De manera que cuando consiguió una cátedra en Cracovia, una parte de Polonia que estaba bajo la dominación del Imperio Austro-Húngaro, pudo llevar un aparato del tipo de los empleados por Cailletet a su nuevo puesto. A lo largo del tiempo introdujo varias mejoras, y así, a pesar de lo exiguo del presupuesto universitario Polaco consiguió establecer a Cracovia como un laboratorio a tener en cuenta por el pequeño grupo de los especialistas en frío de finales del siglo XIX.

En Cracovia se le sumó Karol Stanisław Olszewski, educado en la Universidad de la misma ciudad, una de las escuelas más antiguas de Europa. Los dos colegas consiguieron producir tanto nitrógeno como oxígeno líquido, y en cantidades suficientes como para ser mostrados fuera del aparato de presión. En el aire licuado de Cailletet estaban mezcladas todas las componentes de este gas, mayormente nitrógeno y oxígeno, y al licuarlos por separado los polacos pudieron medir algunas de sus propiedades, como la temperatura de licuefacción a presión atmosférica. Vieron que el oxígeno líquido se movía con un imán, ya que es débilmente magnético, mientras que el nitrógeno no posee esa propiedad. Sus mediciones de propiedades de la transición líquido-gas eran sumamente útiles para las siguientes etapas de licuefacción, así que el trabajo pionero hecho en Cracovia resultó de suma utilidad. Hay que tener en cuenta que en un área nueva como esta todo eran dificultades. Por ejemplo, medir la temperatura era todo un desafío. Había que producir termómetros, porque el viejo y confiable modelo de Fahrenheit, que todavía se usaba, no funcionaba a baja temperatura por congelamiento del mercurio. Una de las soluciones era usar la disminución de volumen de un gas, pero el único “ideal” a esa temperatura era el hidrógeno, y también tenía sus problemas. En Cracovia probaron usar un alambre de platino, que se sabía bajaba su resistencia eléctrica al bajar temperatura. Los termómetros de platino se siguen usando, son cómodos y precisos, ya que basta medir su resistencia y luego usar una tabla de calibración. El problema es fabricar la primera tabla, y esa fue una de las tareas del grupo de Cracovia.

Toda esta tarea de exploración y preparación del terreno para los siguientes investigadores fue útil y se llevó a cabo en una Universidad de larga tradición. En este lugar estudió Copérnico y mucho más recientemente Karol Wotila, quien luego sería el Papa Juan Pablo II. Pero la Universidad estaba pasando por un momento difícil y además estaba lejos de los países donde se hacía ciencia. Polonia estaba dividida bajo la dominación de tres Imperios y Cracovia le había caído

en suerte a Austria-Hungría. Aunque un poco menos autoritaria que la Rusia Zarista, tampoco tenía gran interés en desarrollar el país y educar a sus súbditos, bastante rebeldes por otro lado. Pero Olszewski y Wróblewski lograron vencer las dificultades y montar un laboratorio de punta. Fue un caso donde la motivación, la dedicación y el ingenio lograron superar las barreras de la falta de tradición científica y de apoyo material para lograr un avance significativo. El apoyo del Imperio Austro-Húngaro era escaso, sin duda, pero entre sus conciudadanos polacos los científicos podían contar con ayuda moral y material. El prestigio de la Ciencia era muy grande a fines del siglo XIX, y entre los polacos que luchaban por mantener su identidad cultural era importante que su país tuviera ese liderazgo en la física del frío.

Al principio Wróblewski y Olszewski fueron mirados con alguna desconfianza por sus colegas en países más centrales, otra de las dificultades inherentes a hacer ciencia en la periferia. Pero como también suele suceder, una vez superada la primer desconfianza fueron admitidos sin reservas como miembros valiosos de la comunidad científica. La Academia de Ciencias de París aceptó los resultados del par, que anunciaron su primera licuefacción de oxígeno en 1883. Wróblewski era más conocido fuera de Polonia, ya que Cailletet y otros lo habían tratado en persona. En el mundo pequeño de los investigadores de la época, donde todos se trataban el conocimiento personal era importante para calibrar la capacidad de una persona y en el ambiente se lo mencionaba más a Wróblewski que a Olszewski. Un poco molesto por este trato diferencial, Olszewski decidió trabajar por su cuenta, para que lo tuvieran en cuenta como investigador serio.

Por otro lado, la tragedia alcanzó a Wróblewski en 1888. Trabajando en su laboratorio se volcó una lámpara de kerosén, el líquido encendido cayó sobre él y murió por las quemaduras producidas. Olszewski siguió trabajando, y llegó a anunciar que había observado gotas de hidrógeno líquido, pero su descubrimiento fue puesto en duda más tarde y finalmente se atribuye la primera licuefacción indudable del hidrógeno a James Dewar, un escocés que trabajaba en Londres.

James Dewar nació en Escocia en 1842, y estudió en la Universidad de Edinburgo. De niño tuvo una larga enfermedad, y a los diez años, para pasar el tiempo de encierro forzoso aprendió a hacer violines. Adquirió así una destreza manual que le sería útil luego en su trabajo de laboratorio. En la Universidad tuvo calificaciones excelentes y terminó siendo profesor en Cambridge, la más prestigiosa Universidad de Inglaterra en temas científicos. Se interesó por muchos temas, de química y física, realizando una estadía en Alemania en el laboratorio de Química dirigido por Augusto Kekulé, uno de los más importantes químicos de la época. Una de las cosas en que utilizó sus conocimientos químicos fue en la elaboración de la *cordita* junto con Frederick Able. La cordita, llamada a veces pólvora sin humo, es un explosivo que reemplazó a la pólvora en las municiones. Lavoisier y Rumford fueron de los primeros en fabricar pólvora científicamente, cien años más tarde la ciencia se estaba usando para hacer que las armas fueran todavía más mortíferas. Es una tendencia que lamentablemente sigue en aumento, con enormes presupuestos militares de investigación tecnológica.

Pero a Dewar se lo conoce más por sus investigaciones en bajas temperaturas. Se empezó a interesar en el tema en 1874, y en 1878 reprodujo en la Royal Institution de Londres los resultados de Pictet y Cailletet de licuefacción de aire. Junto con su puesto en Cambridge, también tenía un lugar en la Royal Institution. Esta institución es bastante particular como organización científica. Rumford fue uno de sus fundadores a finales del siglo XVIII. Su época de oro fue el siglo XIX y todavía existe. Hoy en día resulta una institución pequeña, pero en su momento cobijar dos o tres científicos a tiempo completo la hacía importante, aunque lo más importante fue la calidad de los científicos que llegó a albergar. Allí Michael Faraday inventó el primer motor eléctrico, el primer transformador y descubrió la inducción electromagnética, además de múltiples otras cosas en física y en química. Dewar vino después de Faraday y se encontró con la tradición o ley de la Royal Institution que establecía la obligación de organizar conferencias para todo público sobre temas científicos. Las conferencias eran espectaculares, tanto Faraday como su antecesor, Humphrey

Davy eran buenos showmen además de científicos y llegaban a mostrar cosas como grandes chispas eléctricas, reacciones químicas vistosas y tecnología que en su siglo llamaba mucho más la atención que ahora. Hasta la Realeza iba a las funciones de gala que se hacía en Navidad y la alta sociedad pagaba entradas bastante caras, que servían para recaudar fondos suplementarios a la institución.

Por eso Dewar estaba obligado a seguir el espectáculo, y una buena demostración para asombrar al público era licuar aire. Por eso, al poco tiempo de enterarse de los métodos de Pictet y Cailletet, en una de sus charlas mostró aire líquido. Tuvo que modificar el aparato para que el aire licuado se juntara en un tubito de vidrio, ese tubito entraba en lo que en ese momento se llamaba "linterna mágica", un proyector similar a los que se usan ahora. La diferencia es que usaba lámparas de kerosén y por supuesto no estaba conectado a ninguna computadora. Así el público veía el líquido proyectado y aumentado en una pantalla, mientras Dewar explicaba y demostraba el funcionamiento de su licuefactor. Una vez iniciado en el tema, Dewar se entusiasmó y se puso a la tarea de aumentar la eficiencia y capacidad de producir aire líquido y licuar los gases que lo componen.

Para 1891 producía cantidades importantes de aire licuado, en una máquina que para su época era inusual en un laboratorio tanto por su costo como por su tamaño. El método usaba una `cascada´ para enfriar, donde un gas licuado enfriaba el siguiente, y así siguiendo. Un problema de este método es encontrar los gases adecuados, y aunque la parte técnica estaba resuelta, gran parte del costo era el de producir los gases necesarios. Encima una vez producido, el aire líquido volvía a evaporarse rápidamente.

Hacia 1892 Dewar se propuso mejorar la forma de almacenamiento para que no se evaporara tanto líquido. El problema básico es el de la entrada de calor. El líquido se encuentra a 200 grados bajo cero aproximadamente, y el ambiente a 20 por encima. Es como poner un recipiente con agua en un horno a 320 grados, 220 grados por encima de su punto de ebullición. El calor del horno eventualmente hace hervir y evapora toda el agua. El calor se trasmite de dos maneras y eso era ampliamente conocido, así que Dewar sabía que mecanismos de conducción térmica debía eliminar en su recipiente .

En primer lugar la energía térmica se trasmite por lo que se llama conducción, a través algún material. Si pensamos en el calor como forma de energía de vibración, se puede entender la base del mecanismo. En un material con una parte fría y una caliente se trasmite la vibración de los átomos calientes que vibran más, a los fríos que vibran menos. Por eso, a través de la pared de un recipiente el movimiento térmico presente en una habitación pasa al aire líquido y lo calienta. Algunos materiales trasmiten peor que otros y son buenos aisladores, pero el mejor aislador es no tener material ninguno, es decir, un vacío. Así las vibraciones térmicas no pueden pasar. Por eso Dewar construyó un recipiente con una pared doble, y luego evacuó el espacio dentro de la doble pared con una bomba de vacío. Su bomba era mucho mejor que las de von Guericke o Boyle y Hooke porque es necesario un vacío muy bueno para aislar térmicamente. La técnica de vacío, por supuesto, también había hecho progresos en los muchos años trascurridos.

Hay otro mecanismo de trasmisión de energía y este es la *radiación*. Así nos llega el calor del sol a través del espacio interplanetario vacío. También es el calor que sentimos cuando ponemos la mano arriba de la parrilla para sentir si las brasas del asado producen suficiente calor. Una brasa al rojo vivo irradia energía térmica, eso es el origen del calor que siente nuestra mano. Y aunque en mucha menor intensidad (la energía irradiada depende fuertemente de temperatura), aún a 20 grados se irradia calor. Por eso Dewar encontró que era conveniente depositar una capa de metal brillante que refleja gran parte de la energía térmica que llega por radiación.

Así Dewar inventó el termo para tomar mate. Su recipiente era de vidrio, con doble pared evacuada y plateado por dentro. Cualquiera que haya visto la botella interna de un termo reconocerá esta descripción. Funcionaba muy bien para mantener el nitrógeno líquido por horas, y su uso se extendió a muchos laboratorios. Dos vidrieros alemanes, que tenían encargos de laboratorios

interesados para fabricar botellas tipo Dewar, decidieron que el invento tenía futuro comercial. Cuenta la leyenda que la idea les vino cuando uno de ellos empezó a usar un termo para guardar leche caliente para su bebé. Registraron la marca “Thermos” para su invento, y para cuando llegó a nuestro país ya la marca era sinónimo del aparato. En los laboratorios de habla inglesa los siguen llamando “Dewar flask” o sea vaso de Dewar, pero se usa en todo el mundo domésticamente y lo llaman thermos. Como Dewar no lo patentó, el diseño es de dominio público. La marca original Thermos todavía existe.

Pero Dewar pensaba en otra cosa, para él lo importante era licuar el último gas conocido que se seguía resistiendo al frío, el hidrógeno. El desafío era tenerlo líquido y no en forma de una débil niebla efímera. En los experimentos hechos en Polonia se había visto una niebla, pero esto podría deberse a alguna impureza del gas y la mayoría desconfiaba de este resultado. Usando aire líquido en cantidad, contenido en su Dewar flask, como parte de la cascada de frío, James Dewar licuó el hidrógeno por primera vez en 1898. Había llegado a la temperatura más baja registrada hasta entonces, que era de 20 grados Kelvin, o sea 253 grados bajo cero. Veinte grados por encima del cero absoluto. De ahora en adelante, como es usual en la física de bajas temperaturas usaremos preferentemente los grados Kelvin, es decir nuestro punto de partida es el cero absoluto. Dewar produjo suficiente líquido como para usar el truco de bombear el gas para enfriarlo todavía más, y así llegó a producir hidrógeno sólido, a 14 grados Kelvin.

Pero justo un poco antes de llegar a la meta de licuar el último gas `permanente´ conocido, le corrieron la línea de llegada. La culpa la tuvo el helio, un gas que se descubrió primero en el sol, antes de ser encontrado en la tierra. La historia del descubrimiento del helio es interesante, y arranca con el descubrimiento de los llamados gases nobles, que inauguraron una nueva columna en la tabla periódica de los Elementos. Aquí intervino otro escocés, William Ramsay, educado en Glasgow una ciudad escocesa rival de Edinburgo, donde estudió Dewar.

Ramsay también se encontraba trabajando en Londres, y su especialidad era la química. Un día fue a una conferencia dada por Lord Rayleigh, un físico ya famoso, pero que tenía un problema con el nitrógeno. Rayleigh buscaba ayuda entre los químicos, y planteó el problema en esta ocasión. Ramsay pensó que él podía ayudar y juntaron sus fuerzas. El problema parecía en verdad bastante sonso. Rayleigh había medido la densidad del nitrógeno con muchísimo cuidado. Obtenía el nitrógeno de dos maneras diferentes, pero aunque se suponía que el nitrógeno era siempre el mismo material, las densidades no coincidían. Unas muestras venían del aire, rico en nitrógeno y su densidad era de 1.2572 gramos por litro. La manera de obtener el gas era eliminando químicamente los otros componentes del aire. Se podía sacar así el oxígeno, el agua y el dióxido de carbono y quedaba solo el nitrógeno. Otras muestras del mismo gas se conseguían descomponiendo un compuesto rico en nitrógeno, como el amoniaco. Se desprendía el nitrógeno con la reacción química adecuada y se medía así una densidad de 1.2505 gramos por litro. Comparando los números, el nitrógeno que venía del aire pesaba 0.0067 gramos por litro de más. Cuestión de pocos miligramos, pero Rayleigh se tenía fe y estaba convencido de que la diferencia no era un error experimental. Su hipótesis era que debía haber una impureza liviana en el nitrógeno proveniente del amoníaco. Ramsay supuso al revés, una componente pesada en el aire. Entonces decidió eliminar el nitrógeno y ver si quedaba algo más. Pasó sus muestras provenientes del aire a través de magnesio caliente, que forma nitruro de magnesio, un sólido. Pasó el gas varias veces por el aparato y quedó un residuo que no se combinaba. También probó una larga serie de reactivos químicos agresivos, y nada. El nuevo gas era químicamente inerte. Rayleigh midió su densidad y vio que era mayor que la del nitrógeno, como había conjeturado Ramsay.

Se encontraban en el brete de añadir una nueva columna a la tabla periódica, y Ramsay se dedicó a buscar nuevos elementos para poner en su columna. Así encontró otros gases parecidos. Al primer gas lo llamaron Argón, una palabra griega clásica para los trabajadores ociosos, ya que el elemento era químicamente un trabajador bastante haragán. Los otros gases fueron bautizados neón, krypton y luego apareció el radón. Usaban palabras de origen griego clásico. En la época esto estaba

de moda, ya que los clásicos Griegos se enseñaban con profundidad en las escuelas y formaban parte del patrimonio cultural de la gente educada. Los elementos, todos gaseosos a temperatura ambiente, fueron llamados colectivamente gases inertes, o “gases nobles”. Este nombre viene porque no se mezclan con nadie, como los orgullosos nobles que iban perdiendo poder y prestigio en los finales del siglo XIX. Por este trabajo, Rayleigh ganó el premio Nobel de Física de 1904 y Ramsay el de Química del mismo año.

¿Y que hay del helio? Este elemento es el más liviano de los gases nobles, pero se encuentra en la atmósfera en cantidades despreciables, de partes por millón. Sin embargo, ya se conocía desde antes, aunque no se había encontrado en la tierra sino en el sol. Esto fue posible gracias a una nueva técnica de análisis químico descubierta en el siglo XIX por dos científicos alemanes, Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen. Ellos se dieron cuenta de que los elementos químicos emiten una luz característica, y cada uno emite varios colores a la vez. Se puede hacer una prueba burda, poniendo un poco de sal en la punta de un cuchillo y luego acercando la sal a una llama de gas como la de la cocina. Se va a ver que la llama toma un color amarillo brillante. Este color viene del sodio, componente de la sal común, que es cloruro de sodio. Bunsen y Kirchhoff fueron más sistemáticos y además usaron un prisma para mirar la luz emitida. Así vieron que la luz proveniente de quemar distintos elementos formaba franjas de colores. Era parecido a mirar luz blanca con el prisma, con la importante diferencia que pasando la luz del sol por un prisma se genera un continuo de colores, igual al arco iris. En el sodio, en cambio solo se ve una angosta franja amarilla, y luego tenues líneas de otros colores. Cada elemento muestra franjas distintas de colores y esto es muy útil si se tiene un material desconocido para analizar. Es cuestión de calcinarlo en una llama y ver que colores se observan. El prisma separa los colores y ayuda a identificar el elemento, ya que cada color (o longitud de onda de la luz) se desvía distinto y aparece en un lugar definido de una pantalla colocada detrás del prisma.

Todo el método fue desarrollado en detalle por su enorme utilidad de análisis. Así se perfeccionaron los prismas y sistemas ópticos. Robert Bunsen inventó un mechero de gas para tener una llama poco luminosa que sirviera para calentar substancias. Los “mecheros Bunsen” siguen usándose en los laboratorios de química para calentar cosas. Pero también aparecieron formas de hacer que los átomos emitieran luz usando electricidad. Sin entrar en detalles técnicos, digamos que el método es muy adecuado para los gases, y los gases nobles fueron estudiados también haciéndoles emitir luz. Es buena opción para distinguir dos elementos que son inertes químicamente y se encuentran como gases incoloros, invisibles al ojo. Cuando emiten luz, se delatan. El neón, por ejemplo, brilla con una luz roja. A alguien se le ocurrió poner el gas dentro de un tubo de vidrio, excitarlo eléctricamente y darle forma de letra al tubo de vidrio. Así tenemos las letras rojas de neón que vemos en los carteles luminosos.

Ramsay y sus sucesores usaron la técnica como un poderoso método de identificar elementos, ya que si aparecían colores, o franjas de color que no se podían atribuir a elementos conocidos, se podía inferir que venían de un elemento nuevo. Una variante del método, un negativo podríamos decir, fue descubierto por otro investigador alemán, Joseph von Fraunhoffer. Fraunhofer era un mago de la óptica y fabricaba excelentes telescopios y prismas. Fue así que observando la luz solar con su telescopio y uno de sus prismas, encontró que, mirado en detalle, el arco iris solar mostraba pequeñas bandas oscuras. La manera de observar era proyectar la luz solar, pasada por el prisma sobre una pantalla para no quemarse los ojos. En este dispositivo el prisma `desparrama´ la luz del sol en un abanico de colores, que se ordenan siguiendo el orden del arco iris, del rojo al amarillo, verde azul y violeta. Pero mirando con cuidado aparecen sombras más oscuras, y estas sombras caen justo donde caerían los colores emitidos por los diferentes elementos químicos. La razón es que los elementos presentes en la atmósfera caliente del sol absorben los mismos colores que emiten. De esta manera se puede analizar químicamente el sol y otras estrellas, algo que en algún momento se creyó quimérico, o fuera del alcance de nuestra capacidad de medir. Observando un eclipse de sol en 1868, un astrónomo francés, Jules Janssen y uno inglés, Norman Lockyer

observaron franjas oscuras que no correspondían a ningún elemento conocido. Lockyer propuso que la línea venía de un nuevo elemento y lo llamó helio. Se inspiró en el nombre griego del sol y siguió la moda científica de su siglo para el bautizo. Recién en 1895 dos químicos suecos Per Cleve y Niels Langlet consiguieron aislar helio en la tierra. Encontraron que en un mineral de Uranio, la Clevita, se desprendía un gas que emitía colores que se correspondían a las líneas oscuras de Janssen y Lockeyer. Por fin apareció el helio en un lugar accesible y se pudo estudiar en la tierra, midiendo cosas como su densidad y otras propiedades que no se podían medir e el Sol.

Los nuevos gases inertes también fueron sometidos a los procesos, ya bastante establecidos, que permitían la licuefacción. Todos licuaban a temperatura mayor que los 20 K del hidrógeno, salvo el helio. Así que quedaba un elemento más, un nuevo gas permanente. O por lo menos más permanente que los otros. No se podía saber si se licuaba y había que intentar enfriar más para averiguar si era posible.

Dewar estaba bien ubicado en la línea de largada para llegar a licuar el helio primero. Tenía experiencia y había sido el primero en licuar, y no digamos solidificar el hidrógeno. Pero le ganó un holandés, llamado Heinke Kammerling Onnes, otro pionero de las bajas temperaturas que trabajaba en Leyden, Holanda.

A primera vista se diría que la carrera era despareja. Dewar era un investigador famoso, trabajaba en la capital de la potencia mundial más importante en ese momento, y contaba con un buen laboratorio. Kammerilng Onnes estaba en una ciudad de provincias de un pequeño país, y no era tan famoso aunque había hecho ya trabajo científico sólido. Pero había pros y contras que no eran tan evidentes.

Por un lado, Dewar tenía mal carácter y la tendencia a pelearse con sus colegas. Esto lo había enemistado con su compatriota escocés Ramsay, y por lo tanto no podía pedirle helio. El suministro de helio no era un problema menor y a Dewar se le complicaba obtenerlo en la cantidad necesaria. Por otro lado, Dewar era mayormente un trabajador solitario. "En trabajo pionero, es una desventaja tener ayudantes " le escribió Dewar al propio Kammerilng Onnes. Por lo tanto nunca formó un verdadero equipo de trabajo. Sus aparatos tenían problemas de bloqueo porque se congelaban impurezas. Recordemos que a los 20 K en que se licua el hidrógeno todos los otros gases son sólidos y por lo tanto formaban tapones en los tubos delgados de los licuefactores. También son muy comunes las pérdidas de vacío, o sea entradas de aire en lugares donde se quiere que no haya. Suelen ser la pesadilla de la investigación a bajas temperaturas, aún en los mejores laboratorios actuales. La naturaleza no aborrece del todo al vacío, pero le tiene bastante bronca y no es fácil lograrlo. El aparato de Dewar tuvo también su buena cuota de problemas con el vacío.

Kammerling Onnes, fue uno de los primeras personas en aplicar el trabajo en equipo y el uso de instalaciones importantes para hacer investigación científica. Su lugar de trabajo no era un laboratorio de investigación pura, sino una escuela técnica, un lugar donde se preparaba el personal necesario para una industria que se hacía cada vez más sofisticada técnicamente en toda Europa. Se preparaban vidrieros, torneros y técnicos en electricidad, con un muy buen nivel de preparación. Leyden estaba a un paso de Amsterdam y Holanda tenía una buena tradición científica. Una motivación de Kammerling Onnes para su trabajo con los gases era el de explorar experimentalmente un modelo un poco más sofisticado que el del gas ideal, que había sido propuesto por un compatriota y contemporáneo suyo llamado Diderik van der Waals. Los dos hombres trabajaron juntos, y la guía dada por el modelo de van der Waals y el propio autor del trabajo fue una ayuda con la que Dewar no contaba.

No fue nada sencillo licuar el helio. Primero había que encontrar el gas, lo cual no es fácil. El helio es muy abundante en el Universo. Se produce en las estrellas. Una estrella es una enorme bola de hidrógeno, un horno donde se produce una reacción entre los *núcleos* de hidrógeno que se combinan de a cuatro para producir un núcleo de helio. Por eso, siendo el producto de deshecho de la reacción nuclear que se produce, no es de extrañar que se haya detectado helio en el sol y que abunde en las demás estrellas. Es una proporción importante de la enorme masa solar, pero se

pueden imaginar que es difícil ir y recoger gas en la atmósfera del sol. El helio es liviano y se escapa de la Tierra al espacio con suma facilidad, por lo cual el único disponible en nuestro planeta es el que ha quedado atrapado en algunos pozos de petróleo y en unos pocos minerales de la corteza terrestre.

Kammerling Onnes usó un mineral de Torio llamado Monazita, que consiguió gracias a su hermano, que trabajaba en exportación e importación. Había querido competir con Dewar para licuar hidrógeno, pero cuando vio la carrera perdida se concentró en producir hidrógeno líquido abundantemente y en forma eficiente. Su laboratorio estaba bien regulado, con técnicos excelentes, buenos vidrieros y un ingeniero. OOnnes, el director indiscutido, tenía buenas dotes organizativas y así para 1906 poseía una provisión confiable de hidrógeno líquido para pre-enfriar el helio. Mientras tanto, Dewar seguía intentando pero le faltaba a su helio cantidad y pureza. La competición era amistosa, y Onnes en un punto le pidió helio a Dewar para realizar las muy importantes mediciones preliminares. Pero era mucho pedir y Dewar se hizo el sordo. Ramsay en cambio fue más generoso con los holandeses aunque le negaba ayuda a Dewar, con quien se había peleado. Las relaciones e intrigas político científicas tuvieron su importancia.

En realidad, pasó de todo. Cuando Kammerling Onnes quiso licuar hidrógeno su ciudad prohibió el trabajo con una substancia tan peligrosa. En Leyden le tenían verdadera alergia a los explosivos y el hidrógeno tiene la mala costumbre de explotar con facilidad. No era puro capricho del ayuntamiento. Durante las guerras napoleónicas, un barco con pólvora había explotado en el puerto y destruido media ciudad. Eso había ocurrido casi un siglo antes, pero la memoria histórica de Leyden era larga. Fueron necesarias cartas de Dewar y Olszewski desde Polonia para convencer al ayuntamiento de Leyden para que diera permiso. Una vez en posesión de hidrógeno líquido para pre-enfriar y arena conteniendo helio, era cuestión de separar el gas y purificarlo. Llevó casi dos años para tener 160 litros de gas puro. La arena era calentada, con el calor el gas se expandía rompiendo los granos de arena y liberando helio. Después se pasaba el producto por caños sumergidos en aire líquido para condensar los otros gases nobles, se quemaba en presencia de oxígeno para eliminar hidrógeno y otras impurezas y finalmente se pasaba por caños sumergidos en hidrógeno líquido y filtros de carbón para eliminar todas las impurezas. Largo y laborioso, pero cuando se largó el primer intento en 1908 todo funcionó a la perfección.

El aparato era una construcción elaboradísima de vidrio, hecha por los muy hábiles vidrieros del laboratorio, en contraste con el equipo de Dewar principalmente construido por sus habilidosas y propias manos. Por ser de vidrio, en el licuefactor de Leyden el líquido resultaba visible, aunque la línea que lo separa del gas es muy difícil de ver porque el helio líquido es muy transparente. Al principio no consiguieron detectar nada, pero habían juntado unos 60 mililitros de líquido que finalmente fueron avistados a través del recipiente transparente. De manera que en 1908 Kammerling Onnes ganó la carrera por licuar el último de los gases permanentes, y se vio que a presión atmosférica el helio pasa de gas a líquido por debajo de los 4.2 grados Kelvin. Onnes midió un valor de 4.5 K, pero dado que era la primera vez que alguien alcanzaba esa temperatura, 0.3 grados de error se puede considerar como sorprendentemente acertado.

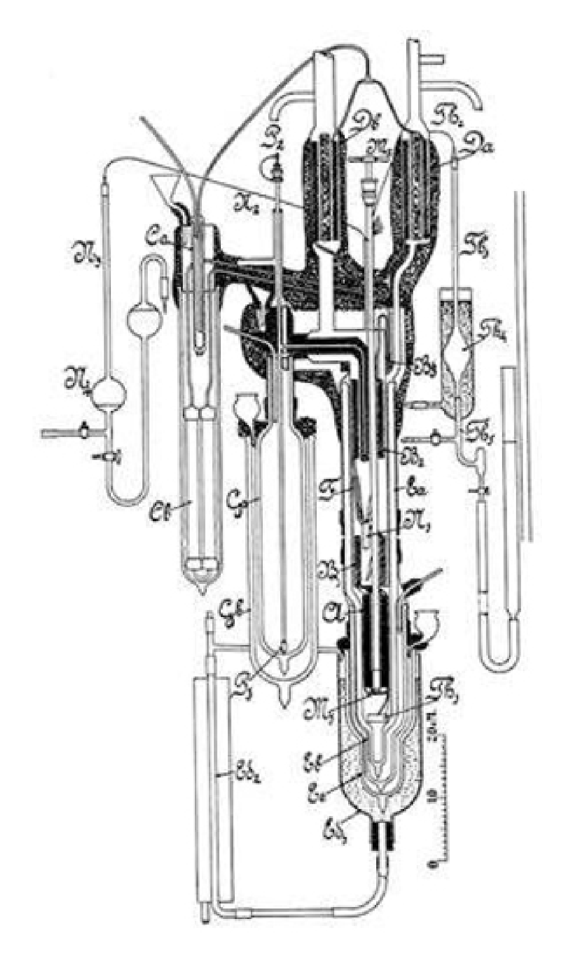


Figura 6 - Helium liquefier. Credit: Ref. [35].

Figura 19

Esquema del licuefactor de Kammerling Onnes. La construcción era de vidrio, y se aprecian las paredes dobles de los vasos de Dewar que separan los diferentes líquidos. El helio se licuaba en la cámara interna del bulbo inferior, con varias capas de líquidos fríos alrededor. Los más internos tenían hidrógeno y nitrógeno líquidos respectivamente.

Aparte del récord, unos años más tarde, en 1911, se descubrió en Leyden un nuevo fenómeno llamado Superconductividad, pero eso es una historia para contar en el próximo capítulo.

Cerca del cero absoluto y lo que se encontró allí.

En 1911 Kammerling Onnes había pasado de la búsqueda del helio líquido a usar su nuevo juguete para hacer otro tipo de ciencia. Por eso se había puesto a medir la conductividad eléctrica de los metales a temperaturas que nadie había alcanzado antes. Tuvo la suerte de elegir el mercurio porque era un material que se podía purificar más que ningún otro, y por mediciones anteriores sabía que eliminar impurezas era importante.

Es raro que se haga un experimento "porque sí" y menos un experimento costoso hecho en una instalación única en el mundo. Enfriar no era barato en insumos y requería unas cuantas personas para manejar el licuefactor. Kammerling Onnes estaba interesado en la respuesta a una pregunta y como pasa a veces, la Naturaleza contesta lo que quiere. En este caso había mucho interés en saber que pasaba con la conductividad eléctrica de un metal cuando se acercaba al cero absoluto. Había dos posturas, algunos esperaban que fuera cero al acercarse a cero y otros pensaban lo opuesto, es decir que se iría a infinito.

¿Qué es la conductividad eléctrica? Es una propiedad que mide la facilidad de un material para llevar corriente eléctrica. Para llevar corriente de un lado al otro conviene usar cables metálicos, porque su conductividad es alta, y para aislarlos y que no nos den un "shock" o una "patada" eléctrica se rodean de plástico, un material con muy escasa o nula conductividad. También es común de hablar de resistencia, definida como la inversa de la conductividad.

Lo que se sabía era que en general la conductividad de los metales aumenta todavía más si se baja la temperatura. O diciendo lo mismo de manera diferente, baja la resistencia. Y aquí había dos hipótesis. El electrón ya se había descubierto en 1898 y se sabía que eran los electrones los que conducían la electricidad. Se sabía también que los electrones podían moverse con facilidad en un metal. Había un modelo desarrollado en Alemania por Paul Dude que explicaba la resistencia. Suponía que al moverse los electrones chocaban con los átomos del metal al azar, y estos choques entorpecían el movimiento. El aumento de conductividad al enfriar se debía a que disminuía la agitación térmica de los átomos, y los choques eran menos en cantidad, facilitando la conducción. Algunos creían que si se bajaba la temperatura hasta que los átomos se detuvieran, se iba a llegar a conductividad infinita porque los electrones iban a poder pasar por entre átomos inmóviles. Pero otros pensaban que a temperatura sumamente baja los mismos electrones se iban a congelar y por lo tanto la conductividad se iba a ir a cero.

De manera que saber lo que pasaba a 4.2 K era importante y Onnes se puso a estudiar el problema. Se sabía que las impurezas, aunque estuvieran presentes en muy poca cantidad limitaban la conductividad a bajas temperaturas. Por eso la insistencia en el material puro. El estudio de conductividad y temperatura venía de lejos. Recordemos que los polacos usaron la resistencia (o conductividad) del platino como termómetro. Resaltamos todos estos detalles para ver en un ejemplo parcial, como en investigación hay una trama de resultados que se van articulando, y un avance depende siempre de otros, sean técnicos, teóricos o de instrumentación. Como conocía el efecto de las impurezas, y sabía que podía purificar el mercurio mejor que otros metales Kammerling Onnes se puso a medir mercurio y en esto fue afortunado, ya que de varias decenas de metales eligió justamente uno que mostraba un fenómeno nuevo a bajas temperaturas.

En abril y mayo de 1911 se realizaron todos los preparativos para el experimento, con dos ayudantes para medir la temperatura por un lado y la conductividad del mercurio a la vez. Los instrumentos de la época eran precisos, pero necesitaban mucha atención. También habían montado un nuevo equipo para poder medir. Trasvasar el helio del licuefactor era complicado, y el equipo era una obra maestra de la construcción en vidrio, hecha por Oskar Kesselring el vidriero y diseñada en conjunto por Gerrit Flimt, el jefe de técnicos del laboratorio. Kammerling Onnes estaba entre los que esperaban que la conductividad aumentara, y efectivamente vieron que a 4 K se medía una

conductividad muy grande, casi infinita. O lo que es lo mismo, resistencia eléctrica cero. Pero pronto vieron que si aumentaban la temperatura había una disminución de conductividad repentina, o un aumento de resistencia, que ya no era cero. El cambio era muy brusco y se producía cerca de 4,2 K.

El experimento se realizaba partiendo de la temperatura más baja (unos 4,0 K) y calentando, porque así era más fácil medir y controlar temperatura. Lo usual era expresar las mediciones como resistencia y no conductividad, por pura costumbre. El gráfico, copiado de la publicación original, muestra la resistencia, que se va a cero abrupta mente en las cercanías de 4,2 K. Kammerling Onnes llamó "supraconductividad" al nuevo fenómeno, pero después se hizo costumbre entre los investigadores llamarla "superconductividad".

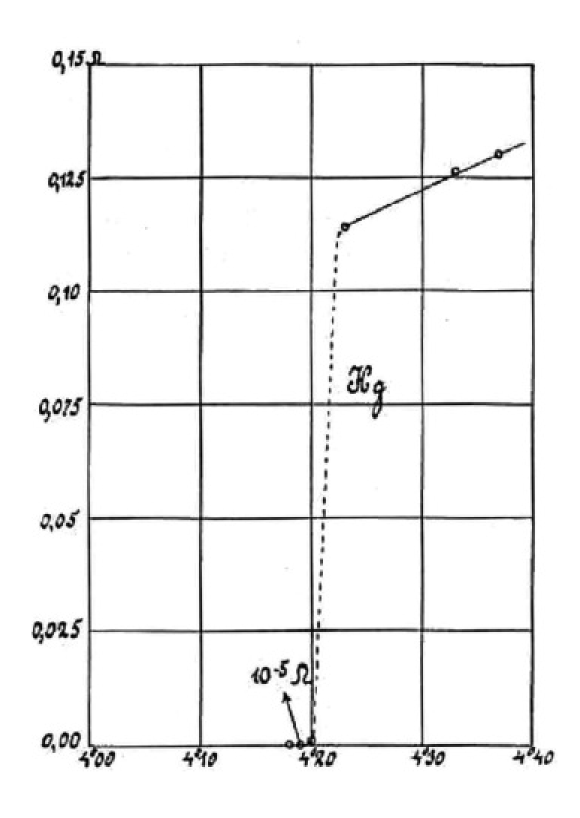


Figura 20
Resistencia eléctrica del Mercurio y transición superconductora. La resistencia se grafica en el eje vertical y la temperatura, en grados Kelvin en el horizontal. En vez de un cambio suave, se observa un salto a 4.2 sumamente abrupto.

Una corriente eléctrica sin fricción ofrece puras ventajas. Por ejemplo al trasportar corriente de una usina se pierde algo por la resistencia que ofrece el cable. Un ejemplo en Argentina es el dique de el Chocón. Como hay 1000 km entre el embalse y los consumidores en Buenos Aires se ahorraría un 15 % de la energía, que es mucha, usando un cable superconductor. Lamentablemente hay un inconveniente para usar el fenómeno. No se conocen materiales superconductores a temperatura ambiente, y mantener frío, a más de 200 grados bajo cero, un cable de 1000 km es tan caro que no compensa el ahorro de energía y no vale la pena.

También se puede hacer un electro imán donde se pone corriente de alguna forma y luego la corriente circula por inercia y mantiene el campo magnético del electro imán sin usar energía de una batería o un enchufe. Kammerling Onnes soñó en un principio con imanes de corriente ilimitada, ya que lo que impide poner mucha corriente en un electro imán es que hay que vencer la resistencia del cable. Los cables superconductores no tiene resistencia, pero aparece otro problema. Los campos magnéticos destruyen el estado superconductor. En el mercurio, con un campo bastante

moderado desaparece la conductividad infinita. Siendo un investigador sistemático y concienzudo, Kammerling Onnes pronto se dio cuenta de este fenómeno que anulaba su sueño.

Hay que decir que más de cien años después de su descubrimiento, seguimos intentando usar la superconductividad en aplicaciones tecnológicas. La Naturaleza ha sido generosa al proporcionarnos el fenómeno, pero maldita en los detalles. Se conocen miles de compuestos que son superconductores, pero hay que enfriarlos cerca de 200 grados bajo cero o aún más, y si el campo magnético es muy grande, también desaparece la superconductividad, y si no, la corriente excesiva también hace que la conductividad no sea infinita.

De todos modos, las expectativas están, y se estudian muchos materiales desde el punto de vista tecnológico para tratar de superar los inconvenientes. Y hay algunos campos especializados en donde se emplea este fenómeno, aunque no se vea en la vida cotidiana. Ya se han encontrado materiales apropiados para algunos usos. Una aleación de Niobio y Titanio, por ejemplo, `aguanta´ un campo magnético bastante grande, y aunque hay que enfriarla mucho (a unos 4 K) se pueden fabricar buenos electro imanes con cables hecho de este material. Esta aleación y otras parecidas son las que se usan en el LHC, el "Large Hadron Collider" del CERN en Ginebra, el mayor acelerador de partículas construído hasta la fecha. El acelerador usa cientos de electro imanes, todos superconductores. El costo es menor en este caso que usar electro imanes con resistencia, que consumirían mucha corriente. Es un balance entre lo que cuesta enfriar y mantener frío, o lo que cuesta pagar la cuenta de la luz. Otro caso donde es ventajosos usar superconductores es en los equipos médicos que obtienen imágenes por Resonancia Magnética. Es necesario un campo magnético intenso para obtener la imagen, y para generarlo se usa muy frecuentemente un electro imán superconductor.

Pero también se estudia la superconductividad desde el punto de vista de la investigación básica, porque el estado superconductor presenta una física muy interesante. Esto es porque conductividad infinita implica que los electrones se mueven sin fricción. La fricción y el rozamiento son inevitables en todos los movimientos conocidos en nuestra vida cotidiana, y esto tiene efectos útiles y otros no tanto. Por ejemplo, podemos caminar gracias a la fricción entre el suelo y la suela del zapato, aunque con patines, donde la fricción se reduce mucho, es posible ir más rápido. Pero sería imposible caminar, y aún patinar si de veras hubiera cero fricción. En el espacio, la ausencia de aire hace que la tierra pueda girar en su órbita sin fricción, por inercia. Y esta misma falta de fricción hace que los astronautas tengan que usar chorros de gas o toberas para desplazarse, y para frenar es necesario usar un chorro en sentido opuesto. Por causa de la inercia, es más fácil moverse que quedarse quieto en un mundo sin fricción.

Encontrar teóricamente la razón por la cual los electrones en un superconductor se mueven sin fricción fue una tarea larga. Pasaron 46 años, casi medio siglo desde 1911 cuando fue descubierto el fenómeno, hasta 1957 cuando apareció la primer teoría microscópica de la Superconductividad. Es difícil dar una idea de esta teoría en términos sencillos, sin usar matemática y conceptos físicos complejos. Lamentablemente, esta es la consecuencia del carácter acumulativo del pensamiento científico. Hay muchos años de desarrollo matemático por detrás de las teorías físicas, y es imposible aprender y manejar la maquinaria matemática a menos que se dedique bastante tiempo y esfuerzo. Esto desgraciadamente hace que las teorías parezcan magia negra, algo solo para iniciados. Pero no hay nada de mágico, y cualquiera que dedique ese tiempo y esfuerzo lo puede entender. Pocas personas le ven sentido a esforzarse, sin ser físicos profesionales y la brecha entre especialistas y no especialistas tiende a crecer. Pero no por eso hay un misterio, ni nada incomprensible para quien tenga una inteligencia normal y la pasión, paciencia y ganas de trabajar que implica entender en detalle hasta donde llega nuestra frontera del conocimiento en física.

Imaginando que el lector medio tiene otras cosas que hacer antes de ponerse con las matemáticas, vamos a intentar dar una idea sin fórmulas ni mucho detalle de lo que se sabe y de lo que *no* sabemos y nos gustaría saber.

En el estado superconductor pasan más cosas que el aumento de la conductividad. Se

descubrió en 1930 en Berlín que dentro de los superconductores se expulsa el campo magnético un efecto que se llama efecto Meissner, porque fue descubierto por Meisner y Oschenfeld. El uso ha hecho que se olvide a Oschenfeld, probablemente por la mala suerte de tener un nombre difícil de pronunciar para quien no hable alemán. El efecto Meissner es en última instancia más fundamental que la conductividad infinita, como hizo notar Fritz London en la década de 1930. Por las leyes del electromagnetismo, el hecho de expulsar un campo magnético del interior del material, solo puede lograrse si hay corrientes eléctricas que circulan en una capa superficial delgada, y se mantienen circulando allí. Las corrientes persistentes solo pueden mantenerse si la conductividad es infinita, como hizo notar London. Es difícil en la práctica asegurar que una conductividad es infinita o una resistencia es cero (dos maneras diferentes de decir lo mismo). Pero si pudiéramos mantener una corriente circulando mucho tiempo y sin usar una batería o generador, por ejemplo en un anillo cerrado de superconductor, se puede medir cuánto decae esa corriente en el tiempo. Si hay mucha fricción se frena rápido, si hay poca se frena lento. Este experimento se hizo, y no se detectó ningún cambio en cerca de dos años, el tiempo que los investigadores tuvieron paciencia para mantener el equipo frío. Por eso, se puede decir que la fricción, o sea la resistencia es cero, o si preferimos, que la conductividad es infinita en un superconductor.

Es importante tomar nota del tiempo trascurrido entre 1911, el descubrimiento de la superconductividad en Leyden y 1930, cuando se descubrió en Berlin la expulsión Meissner(-Oschenfeld). No es casual, Leyden y Kammerling Onnes mantuvieron el monopolio del helio hasta la década del 1930, en parte por que era relativamente caro entrar en ese campo y en parte por la Gran Guerra o Primera Guerra Mundial de 1914-18 que afectó a los principales países europeos. Para 1930 ya había laboratorios con helio líquido en Cambridge, Inglaterra, en Berlín y en Canadá con lo cual se aceleró el ritmo de investigación en Bajas Temperaturas. Otro hito importante fue el descubrimiento de superconductores llamados TipoII, que presentan un efecto Meissner parcial. La ventaja de estos materiales es que son capaces de permanecer superconductores a campos magnéticos más altos y por lo tanto sirven para hacer electro imanes superconductores bastante potentes, que tienen algunas aplicaciones tecnológicas.

Por el lado teórico hubo varias teorías parciales y fenomenológicas hasta 1957, cuando John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schriffer presentaron una teoría microscópica. La teoría BCS, como se la conoce por el nombre de sus autores, es compleja matemáticamente, y utiliza la Mecánica Cuántica. En 1911 no existía la Cuántica, aunque se estaba construyendo, y fue recién en 1925-26 que se tuvo un formalismo cuántico coherente. Luego vinieron las aplicaciones concretas de la cuántica a la física de materiales y sólidos, y recién en 1957 se pudo resolver el problema, bastante sutil de la Superconductividad. BCS postula que a temperatura suficientemente baja, y si el material es adecuado, los electrones se aparean, formando un estado ordenado, que es difícil de perturbar. Para formar estos pares, (llamados "pares de Cooper" porque fue la contribución principal de Cooper a la solución del problema), es necesario que exista alguna atracción aunque sea débil para los electrones. Esto no se da en todos los materiales, y cuanto mayor sea la atracción, más alta será la temperatura crítica, que es la temperatura a la que hay que enfriar para que el material se porte como superconductor, es decir, que tenga efecto Meissner y conductividad infinita. La falta de resistencia, o la conductividad infinita se debe a que el estado ordenado de los pares de Cooper no es fácil de desviar o destruir. Una vez que la corriente se acelera, luego se mantiene andando porque los choques contra la impurezas que antes frenaban de a uno a los electrones no afectan este estado colectivo.

Bardeen, Cooper y Schrifer también fueron capaces de explicar otras propiedades, la forma del Calor Específico, el campo crítico y otras. Se repartieron el Premio Nobel de 1972 por este trabajo. Para Bardeen fue su segundo Nobel, el primero lo ganó en 1956 por el invento del Transistor junto con Shockley y Brattain. Y ya que hablamos de Premio Nobel, Kammerling Onnes lo ganó en 1913 tanto por la licuefacción del helio como por la superconductividad y van der Waals en 1910 por su trabajo teórico. Dewar nunca ganó el Nobel.

Hay una extensa y rica literatura científica basada en el estudio de la Superconductividad. Se conocen miles de compuestos superconductores y sus propiedades. Pero no hay ninguno que no haya que enfriar. La mayor temperatura donde se encuentra superconductividad son unos 138 grados Kelvin, en un compuesto de cinco elementos, Mercurio, Bario, Calcio, Cobre y Oxígeno (la fórmula química es : $HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$). La investigación continúa y aunque es difícil o imposible hacer predicciones, no se pierde la esperanza de encontrar mejores materiales. Hay también otras maneras teóricas, más fenomenológicas y derivadas en última instancia de BCS, que permiten describir y entender mejor este estado de la materia. Pero subsisten interrogantes, y por eso se sigue investigando.

En 1987 se descubrió toda una familia de materiales con temperaturas relativamente altas (por encima de 90 K, bastante más que los 77 K donde licua el nitrógeno) pero aún hay discusión sobre cuál es el mecanismo que hace que los electrones se atraigan para formar los pares de Cooper. El problema es difícil desde el punto de vista teórico, y estamos muy lejos de poder fabricar desde cero un material con las propiedades que queremos. El sueño sería poder diseñar un compuesto, como se diseña un circuito electrónico, por ejemplo. Pero las leyes de la Cuántica que gobiernan la forma en que se combinan los 92 tipos de átomos conocidos, son bastante más difíciles de resolver que las leyes que gobiernan los circuitos eléctricos. Por eso podemos hacer computadoras cada vez mejores, pero el arte de producir compuestos sigue siendo parte arte y parte ciencia. Sabemos mucho más que los antiguos alquimistas, pero hay que trabajar todavía por prueba y error. La intuición de los fabricantes de materiales es importante y generan nuevas recetas todo el tiempo.

La superconductividad es una de las áreas en la que trabaja a baja temperatura, muy activamente. Aunque lo ideal sería tener superconductores donde la baja temperatura sea superflua. Un área menos activa, en número de investigadores por lo menos, es la de *obtener* temperaturas cada vez más bajas. La búsqueda de récords de temperatura baja no tiene aplicación tecnológica obvia, pero “está ahí”. No sabemos que sorpresas puede deparar, por la misma definición de “desconocido”. Así que se sigue buscando bajar más aún, aunque el Tercer Principio descubierto por Nernst, nos dice que es más difícil enfriar cuando está más frío.

El récord de mínima temperatura está hoy cerca de 10 micro grados Kelvin, o sea solo unas millonésimas de grado del cero absoluto. En realidad se tarda mucho tiempo en alcanzar el equilibrio térmico a bajas temperaturas, por eso las temperaturas mínimas se logran en una parte de la muestra que se enfría y no en toda. Por eso ya no es tan unívoca la definición de temperatura, y el problema de definir y medir las temperaturas muy bajas requiere bastante sutileza. De nuevo, no vamos a entrar en los detalles sumamente técnicos que son necesarios para trabajar en esta frontera experimental.

Para algunos especialistas sin embargo, los detalles son apasionantes y necesarios Están tratando de llegar más lejos porque la temperatura “está allí”. Como los montañistas, aunque la montaña más alta ya fue conquistada y el cero absoluto no. Pero recordemos que el cero absoluto es inalcanzable, como el horizonte. Y decía don Atahualpa Yupanqui :

“..Con un horizonte abierto, que siempre está más allá,
y esa fuerza pa´ buscarlo, con tesón y voluntad...”

Atahualpa no hablaba de ciencia, pero podría estar describiendo la búsqueda del cero absoluto y los científicos que se empeñan en esta empresa y otras muchas más.

Epílogo

Algunas advertencias. Podrían ir en un prólogo, pero las prefiero dejar para el final, para el lector que tuvo la paciencia y el tesón de llegar hasta aquí. Aparte de agradecerle la dedicación, y ojalá haya disfrutado algo, hay que decir que este recorrido por la historia y la ciencia es muy limitado.

Limitado en extensión y profundidad, y también por el olvido de muchas personas importantes que no se han podido nombrar. De otra manera habría una lista interminable de nombres. Como ya dijimos en el texto, la ciencia es una construcción colectiva y hay miles de personas que contribuyeron. En este relato, muchos quedan en el tintero, y aún la historia de los que quedaron es un esquema de una vida más compleja y rica. Pero por supuesto es imposible contar todo. Y el mismo hecho de contar es un poco tramposo. Nos gusta una historia, si es posible con héroes y malvados, o con alguna moraleja. Pero los descubrimientos científicos son hechos sin carácter humano, no son buenos ni malos de por sí, aunque son bien humanos los científicos que los hacen y las aplicaciones que les damos. Lo que tienen de interesante las ideas es algo más abstracto que las pasiones humanas, pero la lógica, el poder entender como funciona la naturaleza tiene una belleza particular, aparte de su utilidad práctica. Por supuesto, dado que los científicos son hombres y mujeres, cuentan a veces sus características personales. Confieso que algunos de los nombres seleccionados lo fueron porque tenían asociada una buena historia, o una biografía fuera de lo común. Las ideas de Rumford corresponden a una etapa científicamente menos desarrollada que las de Clausius, pero no hay duda que como personaje es mucho más interesante.

La idea de un libro como este, entonces, no es dar un panorama equilibrado y completo de un área de la ciencia, sino contar una historia que es apasionante, por lo menos para el que escribe esto. Ojalá algo del entusiasmo del autor haya quedado plasmado en la palabra escrita y estimule a algún lector a seguir interesándose por la ciencia. Esta es una actividad humana que para los que la practican es un desafío cotidiano, una forma de ganarse la vida sumamente interesante. Fuente de muchas frustraciones también porque nos chocamos con las limitaciones de nuestro propio intelecto a cada rato, pero cuando llegamos a entender algo ¡cómo lo disfrutamos!

Bibliografia

(Carnot 1987)Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego, Sadi CARNOT , Alianza Editorial, (1987) ISBN 9788420625058 - *Trabajo original de Carnot. Es relativamente largo, pero explica sus ideas con claridad.*

(Asimov 2005) Enciclopedia Biografica de Ciencia y Tecnologia , Isaac ASIMOV, Alianza (Buenos Aires, AR) (2005) **I**SBN-13: 978-8420602325 - *Un conjunto de biografías de científicos que cubre un terreno muy amplio. Con la claridad y estilo de Asimov, un maestro divulgador de la ciencia.*

(Fermi 1984) Termodinámica, Enrico FERMI, Eudeba (1984) ISBN: 978-950-23-0100-6 - *Libro de termodinámica usado en el segundo o tercer año de carreras de Ingeniería o Física. No es de divulgación y puede resultar muy técnico al lector que no necesite estudiar la materia. Por otro lado, están todos los conceptos usados en el texto, explicados por Fermi, (Premio Nobel de Física en 1938) de manera clara y concisa.*

....Un libro de divulgación sobre las propiedades de Superconductores y Superfluídos escrito por dos autores franceses.